

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

International Youth Workshop  
MAGNIT@GORSK  
ROLLING PRACTICE  
2019

Материалы IV международной молодежной  
научно-практической конференции

Под редакцией А.Г. Корчунова

Магнитогорск  
2019

Редколлегия:

Корчунов А.Г. (главный редактор)  
Константинов Д.В. (зам. главного редактора)  
Медведева Е.М. (отв. редактор)  
Мещеряков Э.Ю.  
Шеметов А.Н.  
Пивоварова К.Г.  
Гулин А.Е.  
Песин А.М.  
Чикишев Д.Н.

*Сборник входит в базу данных  
Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)*

**Magnitogorsk Rolling Practice 2019:** материалы IV молодежной научно-практической конференции / под ред. А.Г. Корчунова. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. 128 с.

ISBN 978-5-9967-

В сборнике представлены материалы докладов IV молодежной научно-практической конференции Magnitogorsk Rolling Practice 2019, приуроченной к 85-летию Магнитогорского государственного технического университета имени Г.И. Носова.

ISBN 978-5-9967-

© Магнитогорский государственный  
технический университет  
им. Г.И.Носова, 2019

УДК 621

## **ENHANCED MECHANICAL PROPERTIES OF METAL SHEETS BY SPECIAL ROLLING TECHNIQUES**

**Hailiang YU<sup>1,2,3</sup>**

<sup>1</sup>*Research Institute of Light Metals,  
Central South University, Changsha 410083, China;*

<sup>2</sup>*State Key Laboratory of High Performance Complex Manufacturing,  
Central South University, Changsha 410083, China;*

<sup>3</sup>*College of Mechanical and Electrical Engineering,  
Central South University, Changsha 410083, China*

*hailiang@uow.edu.au*

Rolling techniques have a long history dating back more than 100 years. Generally, the researchers have focused on product profile, product defects, product microstructure, wear and lubrication of roll mill, etc. With the rapid development of bulk ultrafine-grained (UFG) or nano-grained (NG) metals, severe plastic deformation techniques have become increasingly important in rolling. Apart from the accumulative roll bonding technique, some other rolling methods were also considered as SPD techniques. This paper focuses on the application of special rolling techniques for improvement of the mechanical properties of UFG metal sheets. These techniques include asymmetric rolling, cryorolling, asymmetric cryorolling, cross-accumulative roll bonding and skin-pass rolling. The techniques also include a combination of processes such as equal channel angular press and subsequent rolling, combined high pressure torsion and subsequent rolling, as well as combined accumulative roll bonding and subsequent asymmetric rolling. The main metals sheets including aluminium, copper, titanium and their alloys.

УДК 621

## **ELEVATED TEMPERATURE – INCREMENTAL FORMING**

**Puneet Tandon**

*Iiitdm, Jabalpur, India*

*puneet.tandon01@gmail.com*

Incremental Forming (IF) is a dieless forming technique. Unlike conventional forming processes, IF does not require any part specific tooling. It is a flexible forming process which suits for forming of user-specific shapes and low volume production. It utilizes CAD and CAM packages to perform the operation. The customized toolpath is feed into the Computer Numeric Control

(CNC) milling centre. Normally, a hemispherical tool is used for localised deformation of sheet clamped at its outer edges. IF products have applications in many domains, e.g., automobile, marine, nuclear power plants etc., however, it is trendy in the field of biomedical to prepare bioimplants, which usually having different dimensions. Besides, free formed shaped metal panels for aerospace shuttles are easily produced by IF process at very low cost. IF is acknowledged as a promising manufacturing process over conventional forming for the materials having good formability. However, it does not give good results while forming hard to form materials like Titanium alloys, Aluminium-Magnesium alloys, etc.

Several studies show that heat plays an important role in enhancing the formability. On heating, the yield stress value of the materials gets reduced and material become more ductile and its formability improves. Thus, for the materials having poor formability, an advance IF technique, Elevated Temperature Incremental Forming (ET-IF), is developed. ET-IF involves incremental forming of the sheets heated by an external heat supply.

This talk focuses on the implementation of ET-IF. Finite Element Analysis (FEA) is carried out to check the feasibility of ET-IF process. With FEA, utilizing Abaqus CAE conventional IF process (at room temperature) is compared with IF process at elevated temperature on a hard to form material, i.e., Aluminium Alloy EN 6082 AW T6 sheets, and results are compared. It is observed that formability considerably improves with ET-IF process in comparison to that of IF at room temperature. Besides, elevated temperature greatly enhances the quality of IF process.

To validate the simulation results, experimental investigation is carried out. A radiation type heating device for performing ET-IF process is designed and fabricated. Experimentation starts with straight groove test on 1 mm thick sheet of Aluminium Alloy AA1050. Later, a set of experiments are conducted to form different shapes. Experimentations confirms the result of simulation, i.e., delay in fracture and intensification of formability with ET-IF. The work overcomes the limitation of IF process and enlarges the scope of application of the process.

УДК 621

## **ELECTRICALLY ENHANCED PLASTIC DEFORMATION OF STEELS**

*Irene Calliari, Claudio Gennari, Renato Gobbo, Enrico Simonetto*  
*University of Padova, Department of Industrial Engineering,*  
*Padova, Italy*  
*irene.calliari@unipd.it*

Electrically Assisted Manufacturing (EAM) is a recent method developed for materials forming and is based on the EPE induced by either continuous or pulsed electric current on the material flow properties., by enhancing formability, allowing overcoming the limitations imposed by the conventional methods and without excessive process design complexity [1,2].

Different mechanisms were found to induce EPE in the materials – localized resistive heating, electron-induced kinetic energy (electron-wind force) and the presence of an additional quantity of electrons in the material – facilitating dislocations motion within crystal lattices and resulting in an enhancement in materials workability. A second theory invokes *the dissolution of the metallic bonds* because of increased electron presence in the crystal lattice. The additional electrons make easier break and form again the metallic bonds, thus resulting in improved ductility. The last accredited theory envisages the existence of a *microscale Joule heating*, which accounts for local temperature increase at the material defects, helping in increasing the dislocation motion, and, therefore, the metal plasticity. However, the difficulty of separating the thermal effect from the electroplastic one still represents a major issue, in particular when the deformation conditions are not uniform and the part geometry determines non-uniform strain and temperature distributions.

Recent works pointed out that any relationship between crystal structure and a current threshold seems not exist. Many metals were found to be positively influenced by electricity during deformation, but the occurring of EPE was frequently evaluated by measuring the reduction in flow stress at a fixed strain, without bringing the specimens to fracture and without separating the thermal contribution induced by the Joule effect.

An interdisciplinary project has been recently started at the Department of Industrial Engineering (DII) of the University of Padova (Italy). The research is aimed to investigate the various aspects of the electroplastic effect in metals during tensile tests, deriving both from continuous electric current and pulsed regime, in order to achieve reliable data for the application of the EPE to an industrial scale. Several alloys have been tested (stainless steels, Al and Ti alloys) by strained in uniaxial tension applying continuous and pulsed current and in thermal chamber at the same temperature in order to separate the current effect from the heating one. A recent work [3] proposed a correlation between the Stacking Fault Energy (SFE) of the material and the EPE. It has been observed that higher SFE materials show an increase in in uniform elongation during tensile test under continuous electrical current, while in low SFE materials the uniform elongation decreased.

Pulsed electrical tensile tests (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**) compared to the thermal ones show an increase in uniform elongation much more evident compared to the continuous current case. All relative

elongations are comparable except for the test conducted at higher current density because of the higher temperature.

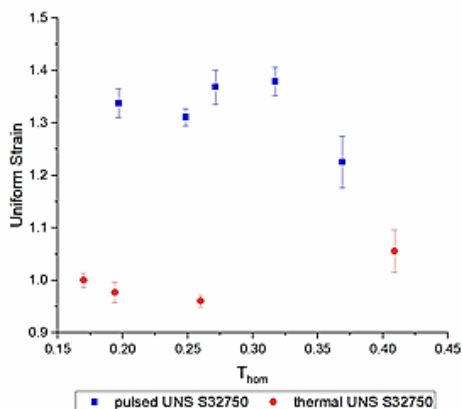


Fig. 1. Relative uniform elongation in Duplex stainless steel.

The circles refer to the thermal tests while squares to the pulsed current tests

In Duplex, the two phases have a different composition and because of the different SFE they work harden in a very different way, which leads to different resistivity of each phase. It has been hypothesized that the electrical current does not flow uniformly throughout each phase, but it follows preferential paths, probably inside the ferritic matrix, that is why an overall positive effect of the current can be observed.

## References

1. Magargee J., Fan R., Cao J. Analysis and observations of current density sensitivity and thermally activated mechanical behavior in electrically-assisted deformation. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 135, p 061022-1 – 061022-8, 2013.
2. T. A. Perkins, T. J. Kronenberger, J. T- Roth. Metallic forging using electrical flow as an alternative to warm/hot working. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 129 (2007), 84–94.
3. Breda, M.; Calliari, I.; Bruschi, S.; Forzan, M.; Ghiotti, A.; Michieletto, F.; Spezzapria, M.; Gennari, C. Influence of stacking fault energy in electrically assisted uniaxial tension of FCC metals. *Materials Science and Technology* (2017, Volume 33), pp.317–325.

## ATOMISTIC SIMULATIONS OF DEFORMATION MECHANISMS DURING METAL FORMING

*Korzniikova E.A.<sup>1</sup>, Sharapov E.A.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Institute for Metals Superplasticity Problems of RAS, Ufa, Russia*

<sup>2</sup> *Bashneft Polyus LLC, Ufa, Russia*  
*elena.a.korzniikova@gmail.com*

Basically the metal forming operates on the materials science principle of plastic deformation, where the physical shape of a material is permanently deformed. The process of the plastic deformation in turn is associated with the continuous evolution of defect structure of the material. Various factors responsible for defects mobility and dynamics of their nucleation and annihilation largely determine the scenario of plastic flow in the material. Among such factors one can recall the stress-strain state, deformation strain and temperature, exc. A huge amount of experimental studies aimed on the increase of the performance of metal forming processes are realized at the moment. Despite the rapid development of the experimental technique, some important aspects of plastic deformation cannot be effectively studied in real time regime due to their small temporal and spatial scale. In such cases, it seems appropriate to use various simulation approaches.

Molecular dynamics (MD) simulation has been widely applied in various complex, dynamic processes at atomistic scale, because an MD simulation can provide some deformation details of materials in nano-processing and thus help to investigate the critical and important issues which cannot be fully revealed by experiments. Extensive research with the aid of MD simulation has provided insights for the development of nanotechnology. One should mention the limitations of the MD method which predominantly consist in the possibility of considering a limited number of atoms and a definite interval of strain rates. However, despite the referred restrictions of the method it can be successfully applied for a number of tasks meeting the established requirements. One can for example recall the atomistic modeling of nanoscale plasticity in high-entropy alloys [1], study of nanoindentation mechanical response of nanocrystalline structures [2] or even the analysis of limits of metal plasticity by direct comparison of numerical and real experiment [3].

The paper presents a comprehensive overview of recent advances in MD studies of deformation mechanisms in metals and alloys taking place during metal forming together with the critical analysis of the possibilities of MD approach application in different fields.

The work was supported by Russian Foundation for Basic Investigation, grant No 18-32-20158.

## References

1. Aitken Z.H., Sorkin V., Zhang Y.-W. Atomistic modeling of nanoscale plasticity in high-entropy alloys // Journal of Materials Research. – 2019. – P. 1–24.
2. Li J. и др. Study of nanoindentation mechanical response of nanocrystalline structures using molecular dynamics simulations // Applied Surface Science. – 2016. – V. 364. – P. 190–200.
3. Zepeda-Ruiz L.A. и др. Probing the limits of metal plasticity with molecular dynamics simulations // Nature. – 2017. – V. 550. – № 7677. – P. 492–495.

УДК 621

## NUMERICAL MODELING AND DEVELOPMENT OF NEW HYBRID METAL FORMING METHODS

*Pesin A.*

*Nosov Magnitogorsk State Technical University,  
Magnitogorsk, Russia  
e-mail pesin@bk.ru*

The paper focuses on the results of the development of theory, mathematical models and novel processes, which were helpful in the forming of the ultra-high strength materials by combining the conventional methods of forming such as drawing, stamping, plate rolling, plastic bending and asymmetrical rolling with the process of incremental sheet forming. The ultimate aim was to manufacture parts having complex geometries of ultra-high strength sheets. Metalworking techniques like asymmetrical rolling gave rise to very high shear strains and it was used for increasing the strength of the materials.

The addition of the incremental sheet forming to the varied combinations of conventional forming processes was used for increasing in the flexibility of the manufacturing process for ultra-high strength.

The results of the research project were also encompassing numerical simulation and experimental investigations of the combined process accompanied by the development of the theoretical models for the same.



## **THE WAY TO IMPROVE THE COMPLEX OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF DRAWN STEEL WIRE**

***Gulin A.E.<sup>1</sup>, Polyakova M.A.<sup>1</sup>, Comazzetto A.<sup>2</sup>***

*<sup>1</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University,  
Magnitogorsk, Russia*

*<sup>2</sup> University of Padova, Department of Industrial Engineering,  
Padova, Italy  
walter\_chel@mail.ru*

The choice of materials is based on two main factors, the customer demands and the exploitation conditions of the final product. Basic operations for metal ware production are based on different kinds of plastic deformation. It is necessary change the shape of the workpiece but also its dimensions. The rapid changings in market conditions and the increasing demand of customers to metal ware properties makes necessary the development of new ideas, in order to react properly to these changings. Keep high quality of the products and be able to control their properties and quality characteristics for all stages of production are important aspects in modern metallurgy, and companies should be able to preserve production efficiency trying to adapt to external impact.

Basic operations like rolling, drawing, extrusion, are limited in performance, productivity, and energy consumption. Moreover, nowadays more flexibility and variability in metal processing is required. This is why other approaches in metal manufacturing processes are essential to improve the performances and properties of the finished products.

Wires are one kind of metal-ware products, and steel wires in particular can be used as final product or as semiproduct (for example for rods, cable, ropes, etc.). Drawing process is the basic operation in wire manufacturing. One of the main problems of the drawing process is the high level of residual stresses in the drawn wire. Requirements of industry are to increase the quantity and improve the quality of drawn products. This lead to the investigation of new approaches for the process, and to improve the level of mechanical properties of the wire. Combination of different operations in metal ware production is a technological method that is used for wires and, more generally, long-length semi-finished products, processing. The main idea of combined deformational processing is the integration of different metal manufacturing processes inducing different kinds of deformations with two or more basic processes.

An important advantage that comes out using applications of combination of different processes instead of direct metal processing is low energy and material consumption, so also lower costs. But another important reason why combined deformational processing with different kinds of deformation in

metal ware production is used, is a technological one. Using specific process parameters and tools (fig. 1), this solution can improve the material properties of the processed workpiece (fig. 2), eliminate defects of it, and reduce the defects induced by a specific process thanks to the influence of the others [1].

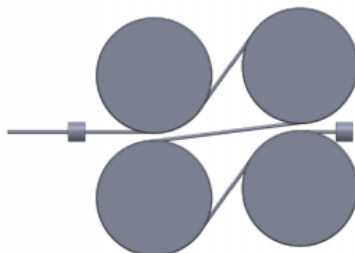


Fig. 1. Four-rolls configuration of the combined processing

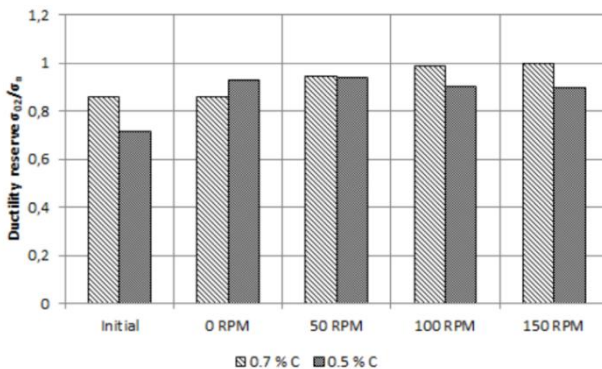


Fig. 2. Relationship ratio yield strength-UTS of high-carbon wire (0.70 %C) and medium-carbon wire (0.50 %C) and rotation velocity of the roller system

This parameter is an indication of the level of stress the steel will sustain beyond its yield point to reach UTS. A low Y/T ratio has been considered as providing a high capacity for plastic deformation and a safe margin against fracture. Results for medium-carbon wire relatively to this parameter show that it decreases, increasing torsion rate. For high-carbon wire the behaviour is the opposite.

### References

1. Polyakova M.A., Calliari I., Pivovarova K.G., Gulín A.E. Approach to obtaining medium carbon steel wire with a specified set of mechanical properties after combined deformational processing // Materials physics and mechanics. – 2018. V. 36. - № 1. P. 53-59.

▪ **IMPLEMENTATION OF THE UNIVERSAL INTERFACE  
THAT ALLOWS THE COMMUNICATION BETWEEN MANY  
MODELS TO PERFORM HOT STRIP ROLLING SCHEDULES**

*mgr inż. Grzegorz Smyk, dr hab. Danuta Szeliga*  
*AGH University of Science and Technology, Krakow, Poland*  
*grzegorz.smyk@agh.edu.pl*

Computer simulations are commonly used in scientific research and industrial product preparation to predict material properties of final product without expensive and time consuming physical experiments. Numerical software based on Finite Elements Methods is provided with strict usage scenarios and functionalities.

Only a few FEM commercial software packages allow to predict microstructure evolution during material processing simulation and in general they do not take it into account material response during the deformation. Many of FEM software programs allow to include user subroutines that extend the software functionalities. The subroutines are used to calculate parameters that programs do not consider or modify algorithms of calculations of some parameters, e.g. plastic stress. Implementation of user subroutines requires to determine many parameters that are not included into numerical software [1]. These subroutines have to be implemented and integrated with FEM packages in a specific manner related to the package requirements.

The main goal of the authors' work is to develop universal framework to integrate users subroutines with any commercial or noncommercial software dedicated simulations of material processing. In this work authors implemented microstructure evolution model for sequence of hot rolling and cooling processes that allows to develop semi-concurrent multiscale model. The model is not sequential because the process parameters have to be integrated after each of the process and the results of one step is an input data for the next process. Moreover the microscale model parameters influence the macroscale model behavior.

The implemented microstructure evolution model takes into consideration such phenomena like dynamic recrystallization during deformation process and static and meta-dynamic recrystallization during cooling process and it allows to calculate average grain size, recrystallized volume fraction and recrystallized grain size during each of the simulation step.

Author's procedure includes the microscale model based on Sellars model [2, 3] of recrystallization and grain growth and was extended with the model of chemical composition for dynamic of static recrystallization [4]. The new model allows to predict the influence of precipitates on recrystallization

phenomena. The simulations were performed for two models and the steel of similar chemical composition except of Nb content.

For author's software implementation the MVC architectural pattern was used that separated data model from calculation controller and view responsible for data presentations. This approach allows to perform many models simulation, not only of the different scales. The implemented models is flexible transferred between various FEM software packages. Development of multiscale simulation with microscale model requires interface implementation for data transfer from one model to another and the way of communication between models in the calculation domain [5] and software (Fig. 1).

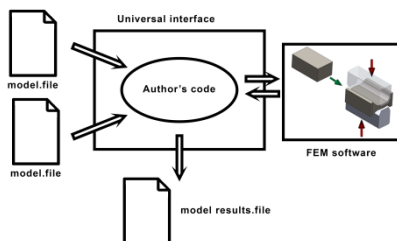


Fig. 1. Scheme of data transfer between implemented models and numerical software via the universal interface

In this work integration was performed for the Simula Abaqus software where simulation sequences of compression and cooling were calculated. Author focused on the interface implementation that allowed to include user procedures to the commercial FEM software. Results of the work present the way of communication between two different commercial numerical software packages based on FEM [6, 7].

## References

1. Szeliga D., Matuszyk P., Kuziak R., Pietrzyk M., Identification of rheological parameters on the basis of various types of plastometric tests, *J. Mat. Proc. Techn.*, 125-126, 2002, pp. 150-154
2. Kowalski, B., Sellars, C.M., Pietrzyk, M., Identification of rheological parameters on the basis of plane strain compression tests on specimens of various initial dimensions, *Computational Materials Science*, 2006, 35, pp. 92-97
3. Sellars C.M., Zhu Q., Microstructural modelling of aluminium alloys during thermomechanical processing, *Material Science and Engineering: A*, 2000, vol. 280, iss. 1, pp. 1-7.
4. Pietrzyk M., Madej L., Rauch L., Szeliga D., Achieving high accuracy and efficiency in metals processing simulations, *Computational Materials Engineering*, Pages I, III, 2015

5. Weinan E, Principles of Multiscale Modeling, Cambridge University Press, 2011,

6. Smyk G, Franzke M., Kuziak R., Pietrzyk M., Coupling microstructure evolution model with FE code for numerical simulation of rolling-cooling sequence for rqls, 23<sup>rd</sup> International Conference on Metallurgy and Materials, Brno, Czech Republic, 2014

7. Szeliga D., Kuziak R., Kopp R., Smyk G., Pietrzyk M., Accounting for the inhomogeneity of deformation in identification of microstructure evolution model, Archives of Metallurgy and Materials, 2015 vol. 60 iss. 4, pp. 3087–3094.

УДК 621.771.074

## **THE STUDY OF THE CLOSURE OF INTERNAL DEFECTS UNDER RADIAL-SHEAR ROLLING USING FEM SIMULATION**

*Irgebai G. A.<sup>1</sup>, Naizabekov A.B.<sup>1</sup>, Panin E. A.<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Rudnensky industrial Institute, Rudny, Kazakhstan*

*<sup>2</sup>Karaganda state industrial University, Temirtau, Kazakhstan  
cooper802@mail.ru*

Despite the current level of development of virtual computing technologies, the main method of research of any technological process is a physical experiment. At the same time, conducting only physical experiments is a very irrational task that requires a lot of effort, time and material resources. The ideal compromise is the use of software systems of virtual modeling, which allow to simulate the process under study, take into account almost all the parameters that affect it, as well as to optimize the process under study, i.e. to determine the values of all dependent parameters at which the process under study will be most stable. After that, when conducting a physical experiment with optimal values, the result will be the most successful, without rejection of the workpiece or equipment failure.

Simufact Forming was chosen for computer simulation. To create a model of radial-shear rolling, it was decided to use the parameters of the existing SVP-08 mill installed at the Rudnensky industrial Institute. The initial blank with a diameter of 30 mm and a length of 150 mm was rolled on the mill with a compression of 3 mm. Workpiece material – aluminum alloy 6063 (0.7% Mg; 0.58% Si; ≤ 0.35% Fe; ≤ 0.1% Cu; ≤ 0.1% Mn; ≤ 0.1% Cr; ≤ 0.1% Zn; ≤ 0.1% Ti; Al – the remaining content). Since the initial recrystallization or diffusion annealing temperature for the selected alloy is 150 °C [1], it was decided to deform at room temperature to eliminate the recrystallization process. Rolling speed was equal to 50 rpm, as the nominal value of the mill SVP-08. The coefficient of friction at the contact of the workpiece and the rolls was

taken to be 0.3, as the recommended value for hot rolling [2]. To analyze the closure of defects in the billet during radial-shear rolling, through holes with a diameter of 3 mm were artificially created in two places: in the center of the billet and at a distance of 75% of the radius from the center.

As a result, after the first pass with a compression of 3 mm, the following patterns of defect closure were obtained in the billet with a diameter of 27 mm:

- in the model with a Central defect, the closure is practically not observed (figure 1). The geometric shape of the defect remains round, while the diameter decreases slightly. This is a consequence of the fact that the Central layers of the workpiece are predominantly longitudinal deformation, due to which there is mainly stretching defect. The diameter of the hole after 1 pass decreased from 3 to 2.8 mm; to 2.6 mm after the 2nd pass and to 2.4 mm after the 3rd pass.

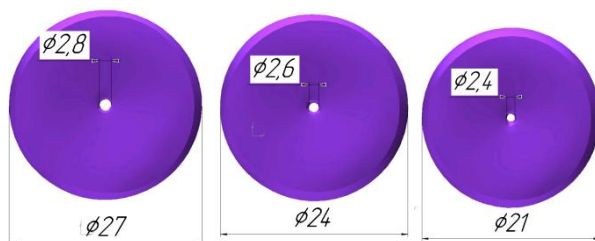


Fig. 1. Blank with a defect in the center

- in the model with a defect in the peripheral zone, the closure occurs on the principle of flattening (figure 2). The geometric shape of the defect is distorted, becoming an oval. This is a consequence of the fact that the peripheral layers of the workpiece, as well as the surface, receive mainly shear deformation, due to which there is a crumpling of the defect and its closure. After 1 pass, the dimensions of the hole steel 2.2 mm in height and 3.4 mm in width.

After 2 passes, the hole height decreased to 1.4 mm, the width increased to 3.8 mm. After 3 passes, the hole height decreased to 0.4 mm, the width increased to 4.2 mm.

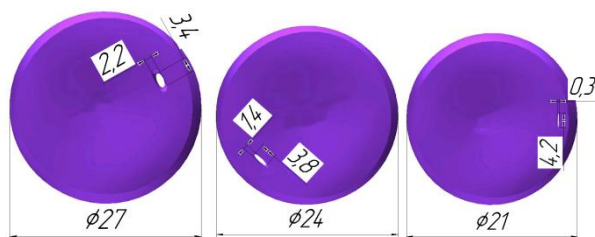


Fig. 2. Workpiece with a defect in the peripheral zone

## Reference

1. Marochnik of steels and alloys / V. G. Sorokin, A.V. Volosnikova, S. A. Vyatkin, etc.; — М.: mechanical engineering, 1989. — 640 p.
2. АСМ Справочник по металлам, вып. 19 - усталость и трещиностойкость. ASM International, 2002, 2592 p.

УДК 669.721:539.89

## **ИНТЕНСИВНАЯ ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ МАГНИЯ МЕТОДАМИ ПОПЕРЕЧНОГО И ОБРАТНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

*Комкова Д.А.<sup>1</sup>, Антонова О.В.<sup>1</sup>, Петрова В.Н.<sup>1,2</sup>, Волков А.Ю.<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup> Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,  
Екатеринбург, Россия*

*<sup>2</sup> Уральский федеральный университет  
имени первого президента России Б.Н. Ельцина,  
Екатеринбург, Россия*

*<sup>1</sup>komkova\_d@imp.uran.ru*

Различные методы интенсивной пластической деформации (ИПД) приводят к формированию ультрамелкозернистой и наноразмерной структуры в металлах и сплавах, значительно повышая механические свойства материалов. Однако холодная деформация магния и его сплавов затруднена из-за особенностей строения ГПУ-решётки. Поэтому деформационная обработка магния осуществляется преимущественно при температурах выше 150°C [2]. Повышенная температура деформации приводит к росту зерна, препятствуя измельчению структуры. Целью данной работы являлась разработка и применение новых методов ИПД магния и его сплавов при комнатной и более низких температурах и изучение структуры и свойств полученных образцов.

Первым методом, использованном в настоящей работе, является поперечное выдавливание (ПВ) магния при комнатной температуре [3]. Для осуществления ПВ цилиндрический образец магния с крупнозернистой структурой помещается в стальной контейнер. Под действием давления магний начинает истекать в виде 1-мм пластины из щели в нижней боковой части контейнера. В результате такой деформации происходит существенное измельчение зерна: от 20 мм в крупнозернистом образце до 3 мкм в 1-мм пластине (рис.1). Обнаружено, что степень измельчения, однородность структуры и острота базисной текстуры (0001) зависят от исходной ориентировки крупнозернистых магниевых заготовок [4]. Полученные 1-мм пластины демонстрируют удлинение до 14% по результатам механических испытаний и могут быть прокатаны при комнатной и

криогенной температурах до фольг толщиной 150 мкм, 50 мкм и 10 мкм. Установлено, что деформация магниевой пластины прокаткой не приводит к дальнейшему измельчению зерна.

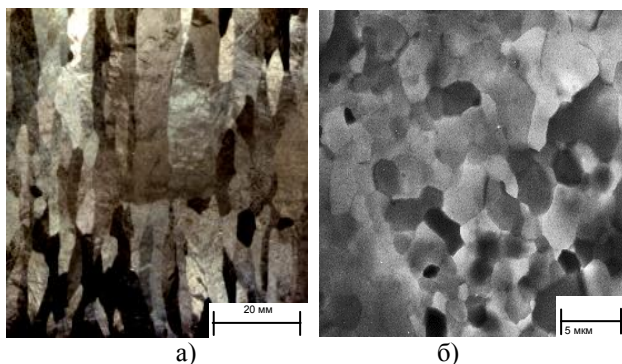


Рис. 1. Микроструктура магния: а) до деформации методом ПВ (исходная заготовка); б) после деформации методом ПВ (1-мм пластина)

Развитием метода ПВ является метод обратного выдавливания (ОВ). При ОВ используется стальной контейнер и пуансон, между которыми обеспечивается зазор. Под действием приложенного давления магний начинает течь навстречу движению пуансона, заполняя зазор и формируя стенку стаканчика. Толщина стенки в экспериментах составляет от 1 мм до 4 мм. Для предотвращения растрескивания магния в процессе ОВ при комнатной температуре разработан оригинальный способ противодействия. Обнаружено, что 1-мм стенки магниевого стаканчика обладают высокой пластичностью и могут быть прокатаны до 150 мкм при комнатной температуре. Этот метод, в отличие от ПВ, позволяет деформировать сплав МА2-1 при предварительном нагреве оснастки с образцом до 150 °С. Последующая деформация прокаткой тонких стенок МА2-1 до 200-мкм фольги осуществляется при комнатной температуре.

Таким образом, в ходе выполнения работы апробированы новые способы ИПД магния при низких температурах, позволяющие сформировать в образцах мелкозернистую структуру и улучшить механические свойства.

Результаты проведенного исследования могут быть использованы для создания тонких магниевых пластин для аккумуляторов, для получения тонких магниевых мембран.

*Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Давление» №АААА-А18-118020190104-3 и при частичной поддержке проекта РФФИ (проект №18-03-00474).*



## Литература

1. Langdon T.G. Twenty-five years of ultrafine-grained materials: Achieving exceptional properties through grain refinement // Acta Materialia. – 2013. – V.61. – №19. – P. 7035-7059.
2. Tork N.B. et al. Investigation on the feasibility of room temperature plastic deformation of pure magnesium by simple shear extrusion process // Material Science and Engineering A. – 2013. – V. 560. – P. 34-39.
3. Каменецкий Б.И. и др. Способ изготовления фольги из магния // Патент РФ № 2563077, заявл. 29.07.2014. 4 с.
4. Antonova O.V. et al. Microstructure and texture of pure magnesium after room-temperature lateral extrusion // Materials Science & Engineering A. – 2017. – V. 706. – P. 319-329.

УДК 621.771.252.01

### **FINITE-ELEMENT MODELING OF THE STRAIN STATE OF ALUMINUM ALLOYS IN PROCESS BY THE METHOD OF ARB**

*Biryukova O.D., Pustovoytov D.O., Pesin A.M.  
Nosov Magnitogorsk State Technical University,  
Magnitogorsk, Russia  
fimapatisonchik@inbox.ru*

Intensive plastic deformation remains the main method of obtaining ultrafine-grained structures. Aluminum alloys are materials that promote correlation between strength and plasticity at a high level with the lowest possible mass, which makes them profitable from the point of view of modern economic development. Particular attention is paid to serial alloys, the most popular of which are alloys of the 5th series (alloys of the magnalium type). Increasingly, bimetallic derivatives from various combinations of series, that determines the type of composite. For example, in researches authors often use the 5 series in conjunction with the 2 series (such as duralumin) or the 7 series (high-strength alloys with good weldability properties of the Al-Zn-Mg-Cu or Al-Zn-Mg system) together with the 5th series. [1,2]

The aim of this work is the finite-element modeling of the stress-strain state of composites during accumulative roll banding of aluminum alloys 1070, 2024 and 5083.

The paper presents the results of a numerical study of the symmetric and asymmetric cases of accumulative roll bonding of aluminum alloys. Accumulative roll bonding, has its advantages over the overwhelming majority of methods of severe plastic deformation.

The process was simulated in the software product Deform 2D. This is modeling system built on the principle of the laws of finite-element problems

analyzer of two-dimensional or three-dimensional space, determines changes in the behavior of materials, mainly metals during metal forming process.

In the simulation, the parameters of the processes were as follows: composites of aluminum alloys 5083/2024 and 5083/1070 with a thickness of 2 mm, a reduction of 50 %. The friction model value was set at 0.3 based on previous modeling experiments. [3,4]

The state of the boundaries of two stacked metals in aluminum composites was analyzed. Accordingly, in this case, it is possible to estimate the change in the behavior of the curvilinearity of the layers of the composite with respect to the influence of one on the other. Since the speed of the upper roll in the asymmetric case will be higher than the speed of the lower roll, the arrangement of the composite layers will correspond to this fact - the upper metal layer is alloy 5083 (more durable) and the lower layer is represented by alloy 2024 and 1070 (softer). The curvilinearity of the layers was estimated by the length of the deformation zone; in the presented graphs (figure 1), the initial position of the metal layers relative to each other is represented by a zero mark in the form of a straight line.

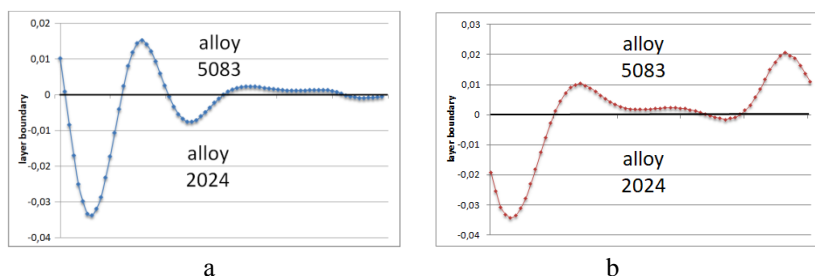


Fig. 1. Distribution of layers of aluminum alloys 2024 and 5083 along the length of the deformation zone (a - symmetric rolling of the composite 5083/2024, b - asymmetric rolling of the 5083/2024 composite with the roll speeds ratio 10%)

It is necessary to understand that the non-uniformity of deformation is caused by certain reasons: features of equipment and form-sizes of the material, presence of chemical segregations, etc. In the case of the influence of factors in the aggregate, uneven deformation is inevitable.

#### Acknowledgments

The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (grant of the President of the Russian Federation, contract No 075-02-2018-347 from 16.11.2018)

## References

1. M. Heydari Vini Mechanical Properties and Microstructural Evolution of AA5083/Al2O3 composites Fabricated by Warm Accumulative Roll Bonding// Advanced Design and Manufacturing Technology - 2016. - Vol. 9 - No. 4 – P. 10-17.
2. M. Heydari Vini Mechanical Mechanical properties and bond strength of bimetallic AA1050/AA5083 laminates fabricated by warm-accumulative roll bonding // Canadian Metallurgical Quarterly – 2017. – P.45-50.
3. Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Biryukova O.D. Study of deformed condition aluminium alloys 1070, 2024 and 5083 at asymmetric and package rolling by method final elements / Materials IIIrd international youth scientific and practical conference. 2018, №1. P. 3-5.
4. Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Biryukova O.D. The effect of speed asymmetry on the strain state in aluminium bimetal during accumulative rolling // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 2018, №1. P.1-4

УДК 621

### THE CHANGE OF THE DEFECTIVE STRUCTURE OF ANNEALED NICKEL UNDER THE ACTION OF ULTRASONIC TREATMENT

*Shayakhmetova E.R.<sup>1,2</sup>, Samigullina A.A.<sup>1</sup>, Zhilyaev A.P.<sup>1,3</sup>, Nazarov A.A.<sup>1</sup>*  
*<sup>1</sup>Institute for Metals Superplasticity Problems  
of the Russian Academy of Sciences,*

*<sup>2</sup>Ufa State Aviation Technical University,*

*<sup>3</sup>Nosov Magnitogorsk State Technical University,  
Magnitogorsk, Russia  
<sup>1</sup>elvina1408@yandex.ru*

Ultrasonic treatment (UST) is used in various technological areas, including obtainment of certain properties in metallic materials or acceleration some processes in them (crystallization [1], phase transformations [2], etc.). Ultrasonic hardening surface treatment is widely used [3]. As its result a fine-grained structure is formed in the near-surface layer. Addition of ultrasonic oscillations to the quasistatic loading during plastic deformation leads, in contrast, to plasticization of the material and to decrease of the flow stress (acoustoplastic effect).

The object of the research is technically pure nickel grade NP2. The aim of the work is to investigate the effect of UST with different amplitudes of stresses on the microstructure and microhardness of coarse-grained (CG) nick-

el in the selected area, in order to ascertain the mechanisms of ultrasound influence on the defective structure of materials.

The microstructure of nickel before and after the UST for each sample, depicted using the EBSD analysis, is shown in Fig. 1 (inverse pole figures – IPF map). On the IPF maps there is a coarse-grained structure with a large number of twins in all states. The grain size and shapes did not change after the UST. The X-ray diffraction study showed that the UST leads to an increase of the root-mean-square microstrain, and the larger, the higher the ultrasound amplitude. The whole dislocation density also increased by an order of magnitude in all states.

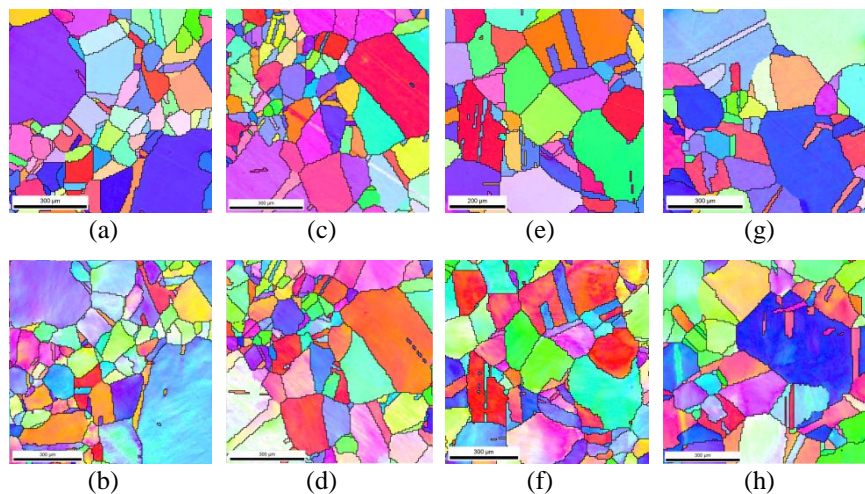


Fig. 1. IPF maps for the samples of coarse-grained nickel before (N1-a, N2-c, N3-e, N4-g) and after UST with the stress amplitude of 20 (b), 40 (d), 60 (f) and 80 MPa (h)

Table 1 shows the quantitative data of the EBSD analysis, table 2 shows the X-ray diffraction data. In all states after the UST the fraction of low-angle boundaries (LAB) is significantly higher than in the same samples before the processing. In addition, the density of geometrically necessary dislocations increased by an order of magnitude in all samples. At the same time, grain sizes did not significantly change.

Table 1. Quantitative data of EBSD-analysis for the samples before and after the UST. LAB – low-angle boundaries, HAB – high-angle grain boundaries

Specimen		EBSD			
		Grain size ( $d$ ), $\mu\text{m}$	LAB, %	HAB, %	$\rho_{\text{EBSD}}$ , $\times 10^{12}$ , $\text{m}^{-2}$
N1	Before UST	58.22	2	98	3.7
	After UST 20 MPa	50.17	65	35	15.2
N2	Before UST	45.16	6	94	5.2
	After UST 40 MPa	52.05	46	54	11.6
N3	Before UST	59.84	11	89	4.6
	After UST 60 MPa	56.48	67	33	16.3
N4	Before UST	64.30	10	90	6.4
	After UST 80 MPa	59.30	58	42	13.4

Table 2. XRD data for the samples of nickel after the UST with different stress amplitudes

US amplitude, MPa	Crystallite size, nm	Microstrain, $\times 10^{-4}$	Dislocation density, $\rho_{\text{XRD}}$ , $\times 10^{12}$ , $\text{m}^{-2}$
0	471.1 $\pm$ 26.0	0.81 $\pm$ 0.41	2.4 $\pm$ 1.2
20	401.3 $\pm$ 20.0	3.68 $\pm$ 0.17	12.8 $\pm$ 0.8
40	591.5 $\pm$ 15.0	4.18 $\pm$ 0.16	98.7 $\pm$ 4.4
60	354.5 $\pm$ 30.0	4.97 $\pm$ 0.31	19.5 $\pm$ 1.9
80	574.8 $\pm$ 66.0	4.53 $\pm$ 0.22	13.4 $\pm$ 1.6

The study of EBSD of the same area of coarse-grained nickel in the initial state and after UST allowed us to demonstrate that under the action of ultrasound dislocation generation and structure evolution occurs. The action of ultrasonic waves led to an increase in the dislocation density by one order of magnitude. According to the results of research conducted in this work, as well as the results obtained earlier, it can be said that the effect of ultrasound on annealed materials with a low dislocation density leads to the accumulation of dislocations and the hardening process.

### References

1. M.D.Luque de Castro, F.Priego-Capote. Ultrasound-assisted crystallization (sonocrystallization) // Ultrasonics Sonochemistry. V. 14, Issue 6 (2007) Pp. 717-724.

2. V. Buchelnikov, I. Dikshtein. Ultrasound-induced martensitic transition in ferromagnetic  $\text{Ni}_{2.15}\text{Mn}_{0.81}\text{Fe}_{0.04}\text{Ga}$  shape memory alloy // Journal of Magnetism and Magnetic Materials V. 272–276, Part 3, (2004) Pp. 2025–2026.

3. A.V. Panin, M.S. Kazachenok, Yu.I. Pochivalov, Yu.F. Ivanov, A.A. Panina, The influence of the initial structural state of armco iron on the ultrasonic treatment effect, Russian Phys. J. 52 (1) (2009) 85–93. DOI: 10.1007/s11182-009-9192-9.

УДК 621.774.2

## **IMPROVING THE ROLLING PROCESS OF WORKPIECES WITH INTERNAL DEFECTS**

*Pozhidaeva E.B., Chikishev D.N.*

*Nosov Magnitogorsk State Technical University,  
Magnitogorsk, Russia  
pozhidaeva.e@icloud.com*

One of the most important tasks of hydrocarbons pipeline transportation is to ensure its reliable and safe operation by reducing the risk of accidents.

Given the insignificant differences in the values of controlled parameters, some pipes failed the full-scale tests, while the others were successfully tested.

In the search for new promising steel grades we developed an algorithm that allows making an informed choice of construction material.

The application of the developed algorithm makes it possible to find new technical and process solutions corresponding to constantly changing requirements to low-alloy steels.

The most significant nucleation and growth factors of such a defect as segregation were identified. The effect of chemical composition (C, Mn, V, Nb) and process factors (roll speed, reduction rate) on defects growth was evaluated. The influence of the workpiece thickness, temperature conditions and chemical composition was evaluated both qualitatively and quantitatively.

mathematical modeling of rolling process of the workpiece with internal defects was performed. Threshold levels of stress, which contribute to segregation defect eliminating were obtained.

The comprehensive research helped to develop new test types for promising materials that allow for more accurate classification of existing steels and other materials.

The characteristics of crack resistance (fracture toughness) under static loading were determined by various methods.

Completed research allowed to develop the following techniques: predicting of segregation based on mathematical modeling; ranking of defect nucleation factors; estimate making of the threshold stress level in the workpiece, resulting in segregation elimination.

#### References

1. Chikishev, D. & Pozhidaeva, E. Int J Adv Manuf Technol (2017) 92: 3725. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0435-6>
2. Salganik, V. Chikishev, D. & Pozhidaeva, E. Materials Science Forum, Vol. 870, pp. 584-592, 2016

УДК 621.777

### **РАЗРАБОТКА РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Zr, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ СОВМЕЩЁННОГО ЛИТЬЯ И ПРОКАТКИ-ПРЕССОВАНИЯ**

*Дурнопьянов А.В.<sup>1</sup>, Беспалов В.М.<sup>1</sup>, Сидельников С.Б.<sup>1</sup>, Ворошилов Д.С.<sup>1</sup>, Бернгардт В.А.<sup>1</sup>, Бермешев Т.В.<sup>1</sup>, Назаренко Д.В.<sup>1</sup>, Кулишова Е.А.<sup>1</sup>*  
*<sup>1</sup>ФГАОУ ВО СФУ, Красноярск, Российская Федерация*  
A.Durnopyanov@yandex.ru

Современное развитие электротехники и инфраструктуры городов приводит к необходимости создания продукции в виде прутков и проволоки кабельно-проводниковой продукции, которая при этом должна иметь минимальный вес, максимальную электропроводность и сохранять прочность при длительных нагревах до 210 °С. Эффективным методом получения такой продукции являются методы совмещённой обработки, такие как совмещенная прокатка-прессование, Кастекс, совмещенное литье и прокатка-прессование (СЛиПП) [1,2]. Для производства указанной продукции предложено использовать алюминиевый сплав системы Al-Zr с различным содержанием железа.

Целью работы, таким образом, является получение проволоки с требуемым уровнем свойств и исследование влияния режимов обработки на структуру, механические свойства, термостойкость и электрическое сопротивление деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al-Zr различного химического состава. Химический состав исследуемых алюминиевых сплавов представлен в табл. 1.

Таблица 1 – Химический состав исследуемых алюминиевых сплавов

Сплав	Al	Zr	Si	Fe
1	основа	0,22	0,07	0,18
2	основа	0,30	0,10	0,20

Методика экспериментальных исследований заключалась в следующем. Заготовки получали методом СЛиПП на установке совмещенной обработки СПП-200 [3, 4]. Металл нагретый до температуры  $T_{\text{зал}} = 800$  °С, подавался в закрытый калибр валков подогретых до 100 °С, затем прокатывался, распрессовывался и выдавливался через калибрующее отверстие матрицы со скоростью деформации  $\dot{\zeta} = 0,74$  с<sup>-1</sup>, что соответствует частоте вращения валков  $\omega = 4$  об/мин. Временное сопротивление разрыву  $\sigma_{\text{в}}$  и относительное удлинение  $\delta$  определяли методом растяжения на машине LFM 400 фирмы Walter Bai AG, удельное электросопротивление  $\rho$  прутков измеряли на миллиомметре «ВИТОК».

В результате, были получены прутки диаметром 5, 7 и 9 мм, с механическими характеристиками, представленными в табл. 2.

Таблица 2 – Свойства прутков из алюминиевых сплавов.

Сплав	d, мм	$\mu$	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\delta$ , %	$\rho$ , Ом·мм <sup>2</sup> /м
1	5	14,3	105	140	29	0,0324
	7	7,3	96	128	29	0,0322
	9	4,4	86	125	31	0,0321
2	5	14,3	106	141	24	0,0330
	7	7,3	102	136	25	0,0329
	9	4,4	90	131	31	0,0328

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

- максимальное значение временного сопротивления разрыву 141 МПа достигается при прессовании прутков из сплава 2 с вытяжкой  $\mu = 14,3$ ;
- минимальное значение временного сопротивления разрыву 125 МПа достигается при прессовании прутков из сплава 1 с вытяжкой  $\mu = 4,4$ ;
- минимальное значение электрического сопротивления 0,0321 Ом·мм<sup>2</sup>/м имеют прутки из сплава 1, полученные при вытяжке  $\mu = 4,4$ ;
- увеличение содержания циркония с 0,22 до 0,3 %, приводит к увеличению временного сопротивления разрыву прутков с 125 до 131 МПа и не существенному повышению электросопротивления.



## Литература

1. Мещанов В. Г. Анализ основных тенденций в развитии мирового производства кабелей и проводов / Кабели и провода. 2012. – №4. – С. 3-7.
2. Сидельников С. Б., Довженко Н. Н., Загиров Н. Н. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов: монография. – М. : МАКС Пресс, 2005. – 344 с.
3. Беспалов В. М., Сидельников С. Б., Довженко Н. Н., Лопатина Е. С., Ворошилов Д. С., Самчук А. П., Якивчук О. В., Дурнопьянов А. В., Кулишова Е. А. 3D-моделирование и исследование процесса совмещенной обработки для получения прутков из сплавов системы Al—Zr // Производство проката. 2019. – №1. – С. 20–25.
4. Беспалов В. М., Сидельников С. Б., Довженко Н. Н., Ворошилов Д. С., Якивчук О. В., Бермешев Т. В., Дурнопьянов А. В., Назаренко Д. В., Сидяров Н. С. Исследование влияния параметров процесса совмещенного литья и прокатки-прессования на структуру и свойства деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al—Zr с различным содержанием легирующих элементов // Производство проката. 2019. – №3. – С. 21–28.

УДК 621.771

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСЛОЙНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ПРОКАТКЕ ПЯТИСЛОЙНОГО СТАЛЕАЛЮМИНИЕВОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА «СТЗСП + АМГЗ»

*Селезнев В.С.<sup>1</sup>, Каманцев И.С.<sup>2</sup>, Салихьянов Д.Р.<sup>1,2</sup>*

*<sup>1</sup>Уральский Федеральный университет*

*имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,*

*Екатеринбург, Россия*

*<sup>2</sup>Институт машиноведения, Уральское отделение*

*Российской академии наук, Екатеринбург, Россия*

*sseva.00@mail.ru*

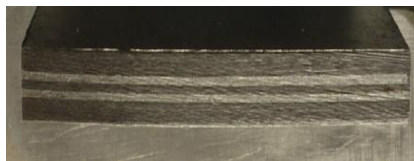
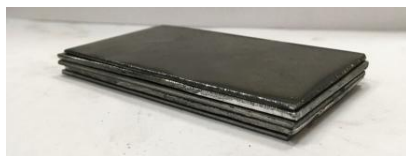
В настоящее время сталеалюминиевые слоистые композиционные материалы (СКМ) находят широкое применение в различных отраслях промышленности: в автомобильной и судостроительной промышленности, в качестве конструкционного материала, вкладышей подшипников. Сталеалюминиевые СКМ характеризуются сочетанием высоких механических свойств и ударной вязкости, хорошей коррозионной стойкостью, высокой тепло- и электропроводностью, низкой удельной массой [1].

Перспективным и экономически эффективным промышленным спо-

собом производства широкого класса композиционных материалов является совместная прокатка листовых материалов. Главные преимущества в сравнении с прочими способами (сварка взрывом, совместное прессование и волочение, литье, наплавка, нанесение порошковых покрытий и др.) заключаются в высокой производительности процесса, возможности автоматизации, относительной простоте контроля процесса, в отличие от сварки взрывом – более высоком качестве и точности размеров слоистых композитов, меньшем уровне растягивающих напряжений.

Производство СКМ связано с рядом проблем, обусловленных различием прочностных и пластических свойств составляющих композита, прежде всего со сложностью обеспечения соединения слоев СКМ и разной их деформируемостью. Последнее осложняется разными значениями начального сопротивления деформации, степени упрочнения, разными контактными условиями для отдельных слоев. В результате определение конечной толщины слоев СКМ после прокатки существенно осложняется. Решение обозначенной научной проблемы возможно несколькими путями – разработка математической модели процесса [2], разработка компьютерной модели и выполнение серии вычислительных экспериментов [3], выполнение натуральных экспериментов. Наиболее предпочтительным вариантом решения является математическая модель процесса, вследствие универсальности и возможности быстрого получения результата, однако точность решения задачи снижена из-за принятых допущений при разработке математической модели процесса прокатки СКМ.

С учетом вышесказанного, в настоящей работе была поставлена задача исследования распределения деформации по слоям и по длине СКМ в зависимости от степени деформации всего пакета путем физического эксперимента на стане «Дуо» с валами диаметром 255 мм. Для экспериментального исследования выбран пятислойный СКМ «Ст3сп+АМг3» с распределением слоев «Т+М+Т+М+Т», где «Т» – твердый слой (Ст3сп), «М» – мягкий слой (АМг3). Выбор количества и порядка распределения слоев обусловлен практической значимостью [4], выбор материалов – их доступностью и наличием кривых упрочнения для последующего математического и компьютерного моделирования. Было собрано три пакета, которые были обжаты с разной суммарной степенью деформации – 30, 40 и 50%. На рисунке 1 представлен пакет до прокатки (рис. 1, а) и пятислойный СКМ после прокатки (рис. 1, б).



а)

б)

Рис. 1. Пакет до прокатки (а) и после прокатки (б)

Результаты измерения степеней деформации по слоям сталеалюминиевого композита при прокатке по одному из вариантов представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Послойные деформации при прокатке пятислойного сталеалюминиевого СКМ «СтЗсп + АМгЗ»

№ слоя	Материал	Исходные толщины слоев, мм	Конечные толщины слоев, мм	Степень деформации каждого слоя $\epsilon_i$ , %
Σ	Пакет	8,43	4,23	49,82
1	СтЗсп	1,5	1,3	13,33
2	АМгЗ	1,95	0,52	73,33
3	СтЗсп	1,52	0,41	73,03
4	АМгЗ	1,97	0,6	69,54
5	СтЗсп	1,49	1,4	9

Из представленных данных видно неравномерное распределение степени деформации по слоям, при этом расположение слоев (граничные условия) оказывает важное влияние. Несмотря на одинаковую исходную прочность стальных слоев, видно, что в процессе прокатки они получили разную степень деформации.

Полученные результаты планируется использовать в дальнейшем для сопоставления с результатами математического и компьютерного моделирования.

Исследование выполнено в рамках базовой части государственного задания № 11.9538.2017/8.9. Работа выполнена при финансовой поддержке постановления №2 11 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.А03.21.0006.

Работа выполнена с использованием ЦКП «Пластометрия» в рамках государственного задания (тема № АААА-А18-118020790147-4).

#### Литература

1. Кобелев А.Г., Лысак В.И., Чернышев В.Н. и др. Производство металлических слоистых композиционных материалов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – 496 с.
2. Л.М. Пучкова. Особенности совместной прокатки высоких слоистых полос разнопрочных металлов // Производство проката. – 2014. – № 9. С. 3-10.
3. С.В. Гладковский, А.И. Потапов, И.С. Каманцев, Д.Р. Салихьянов. Исследование напряженно-деформированного состояния сталеалюминиевого композита при прокатке // Математическое моделирование в естественных науках: материалы XXV Всероссийской школы-конференции молодых ученых и студентов. Изд-во ПНИПУ. – 2016. С. 84-87.
4. С.В. Гладковский, Т.А. Трунина, Е.А. Коковихин [и др.]. Исследование влияния конструктивных элементов и способов изготовления на

УДК 621.777

**DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR OBTAINING WIRES  
OF ELECTROTECHNICAL PURPOSE FROM ALLOYS  
OF THE Al-REM SYSTEM RECEIVED BY USING METHODS  
OF COMBINED PROCESSING**

*Voroshilov D.S., Sidelnikov S.B., Timofeev V.N., Motkov M.M.,  
Bespalov V.M., Bermeshev T.V., Durnopyanov A.V., Nazarenko D.V.  
SFU, Krasnoyarsk, Russian Federation  
sibdrug@mail.ru*

In modern world industry there is a growing need for innovative technologies and materials for metal forming. A group of such materials are longish deformed semi-finished products of small cross-section in the form of rod, bars and wires of various aluminum alloys [1]. A separate type of promising technologies are continuous extruding methods (combined rolling-extruding (CRE), Conform), as well as combined processing (casting-rolling, Castex, combined casting and rolling-extruding (CCRE)) [1, 2]. SFU scientists have proposed and patented devices and methods of combined processing to obtain longish products of small cross-section. At the same time, the level of labor intensity and energy costs for obtaining such products can be reduced several times [2, 3].

Recently, an acute need has arisen for an electrical wire made of aluminum alloys with rare-earth metals for posting aircraft systems with enhanced strength properties and heat resistance. In this case, the operating temperature of such conductors is up to 250 °C. Previously, a multi-stage, labor-intensive technology with many technological conversions was used for the production of such wire. The authors have proposed technologies for producing wires from alloys of the Al-REM system, including the production of a cast billet in an electromagnetic mold (EMM) and its further processing using combined rolling-extruding [3].

According to specifications 1-809-1038-2018, electrical wire from alloy 01417 (contains Ce, La and REM in the amount of 7-9%) should have a set of properties: for a diameter of 0.10-0.26 mm - ultimate tensile strength in the annealed condition 140 MPa, Elongation to failure - 5%, electrical resistance at 20 °C – 0,0320 Ohm·mm<sup>2</sup>/m.

The aim of the work, therefore, is to obtain a wire from alloy 01417 with the required level of properties and to study the effect of processing

modes on the mechanical properties and electrical resistance of deformed semi-finished products.

The relevance of the work is confirmed by the fact that the reported study was funded by RFBR, the Government of Krasnoyarsk Krai and Limited Liability Company "Research and production center of magnetic hydrodynamics" according to the research project № 18-48-242021 «Development of the fundamentals of obtaining deformed semi-finished products for electrical purposes from high-alloyed alloys of the Al-REM system using processing methods and analyzing their rheological properties».

The studies were carried out according to the method already developed [2] on the CRE-200 installation. From a billet with a diameter of 12 mm (the microstructure is shown in Fig. 1, a) heated to 550 °C, a bar with a diameter of 5 mm (the microstructure is shown in Fig. 1, b) was obtained using the CRE method. Next, from the resulting bar with a diameter of 5 mm, a wire with a diameter of 0.5 mm was obtained using two technologies: drawing with intermediate annealing and bar rolling with intermediate annealing and subsequent drawing (the microstructure is shown in Fig. 1, c).

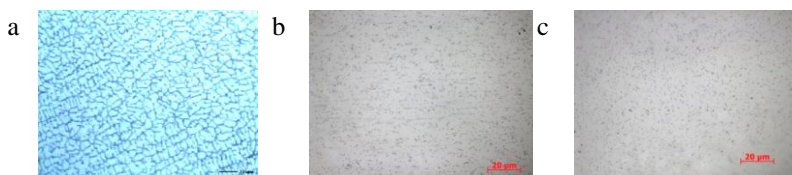


Fig. 1. Microstructure: a – continuous casting billet  $\varnothing$  12.0 mm, obtained in EMM; b – rod  $\varnothing$  5.0 mm after CRE; c - wire  $\varnothing$  0.5 mm in annealed state, obtained with bar rolling with intermediate annealing and subsequent drawing

Studies have led to the following conclusions:

- to implement the CRE method, it is advisable to use a continuous-cast billet with a diameter of 12 mm, which has a uniform structure and length and a high plasticity due to the minimum dendritic parameter, which is comparable to the size of dendritic cells in granules, i.e. 6-12 microns;

- technological scheme of EMM+CRE followed by bar rolling and drawing or only drawing allows obtaining the required level of mechanical properties, as well as the values of electrical resistance according to specifications 1-809-1038-2018.

- the maximum ductility required to further obtain a wire with a diameter of up to 0.1 mm, and a minimum value of electrical resistivity, is characterized by a wire with a diameter of 0.5 mm, obtained by the method of EMM+CRE followed by bar rolling and drawing, annealed at 500 °C and holding time 1 hour.

## References

1. Gorbunov Yu.A. The Role and Prospects of Rare Earth Metals in the Development of Physical-Mechanical Characteristics and Applications of Deformable Aluminum Alloys // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2015. – Vol. 8. – Iss. 5. – pp 636–645.
2. Sidelnikov S.B., Dovzhenko N.N., Zagirov N.N. Joint and combined methods of processing of non-ferrous metals and alloys : monography. – Moscow : MAKS Press. 2005. – 344 p.
3. Sidelnikov S.B., Dovzhenko N.N., Voroshilov D.S., Pervukhin M.V., Trifonenkov L.P., Lopatina E.S., Baranov V.N., Galiev R.I. Investigation of the structure of the metal and evaluation of the properties of samples from an alloy of the Al-REM system obtained by the combined methods of casting and forming // Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova. – 2011. – Vol. 2 (34). – pp 23–28.

УДК 621.771.074

### **STUDY THE INFLUENCE OF THE PRE-FINISH CALIBER FORM ON THE EFFECTIVENESS OF THE GROOVES FILLING IN THE FINISHING PASS DURING REINFORCING STEEL ROLLING**

*Panin E.A.<sup>1</sup>, Krivtsova O.N.<sup>1</sup>, Lezhnev S.N.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Karaganda state industrial University, Temirtau, Kazakhstan*

<sup>2</sup> *Rudny industrial Institute, Rudny, Kazakhstan  
cooper802@mail.ru*

In the rolling shop of JSC "ArcelorMittal Temirtau" a continuous bar mill is installed, which is designed for rolling both round and reinforcing profiles. Despite the constant improvement of the rolling technology in the production of rolled steel products there is still a big share of the defect metal. In particular, during rolling reinforcing steel, such a geometric defect as the absence of longitudinal or transverse ribs is common.

For a detailed study of the process of rolling the reinforcement profile and its further optimization, it was decided to conduct computer simulation in the software complex "Deform-3D". In works [1-2] proposed the most rational from the point of view of authors, form of pre-calibers for rolling reinforcing steel – one-radius oval and flat oval with double concavity. Also, in the work [3], a new calibration for rolling round and reinforcing steel was proposed, the main feature of which is the pre-finishing caliber, made in the form of a smooth barrel. To assess the impact of the pre-form caliber form on the strain state, a single simulation was conducted, i.e. only the pre-finishing caliber was simulated, after which the calculation of the finishing pass was conducted. As a result of modeling the following results of equivalent strain distribution were obtained (Fig. 1).

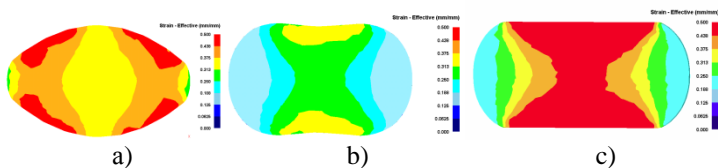


Fig. 1. Distribution of equivalent deformation: a) one-radius oval; b) flat oval with double concavity; c) smooth barrel

From considered calibers, the most uniform distribution of deformation provides a flat oval with double concavity, where the spread in the vertical and horizontal directions is approximately the same. In the other two calibers, the spread difference is quite different.

As a result of the calculation of the model of the finishing caliber, the following results are obtained (Fig. 2).

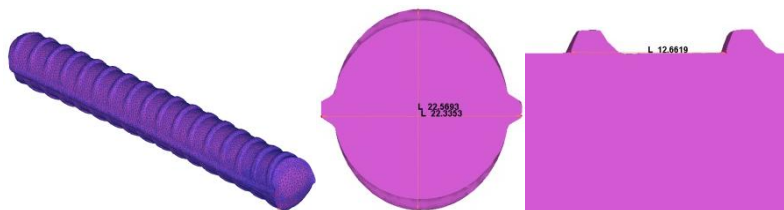


Fig. 2. Model of the finishing caliber

After rolling in the finishing pass, the metal completely filled the contour of the caliber, as well as the screw cuts of the transverse ribs. Longitudinal ribs are also fully formed.

The main requirements for geometric dimensions, according to GOST [4], are the correspondence of vertical and horizontal diameters  $d_1$  and  $d_2$ , which characterize the height of the longitudinal and transverse ribs. The values and acceptable deviation of the diameter  $d_2$  corresponding to the GOST according to diameter  $d_1$ . The ovality of the section (the difference between  $d_1$  and  $d_2$  in one section) should not exceed the sum of the plus and minus limit deviations in size  $d_1$ . In addition, an important characteristic of the geometry of reinforcing steel is the value  $t$ , which determines the distance between two adjacent transverse edges.

As shown in Fig. 2, the value of  $d_1$  in the resulting model is 22.569 mm, the value of  $d_2$  is 22.335 mm. Deviation of  $d_1$  is 0.269 mm,  $d_2$  – 0.035 mm, that fully corresponds to the specified values of the limit deviations. The oval shape of the rod is 0.234 mm, which also meets the requirements of GOST. The value of  $t$  is 12.66 mm, which fully corresponds to the table value with a permissible limit deviation of  $\pm 15\%$ , (in our case it is 5%).



## References

1. Смирнов В.К., Шилов В.А., Инатович Ю.В. Калибровка прокатных валков. Учебное пособие для вузов. — Издание второе, переработанное и дополненное. — М.: Теплотехник, 2010. — 490 с.
2. Технология прокатного производства. Беняковский М.А., Боговяленский К.Н., Виткин А.И. и др. — М.: Металлургия, 1991. - 423 с.
3. Асанов В. Н., Стеблов А. Б., Тулупов О. Н. Совершенствование калибровки валков для прокатки круглых и арматурных профилей.// Сталь, 2008, №11. - С. 90-92.
4. ГОСТ 10884-94. Сталь арматурная термомеханически упроченная для железобетонных конструкций. 2009.-14 с.

УДК 621.7.08, 621.77.08

## RESEARCH ON DYNAMIC RECRYSTALLIZATION SOFTENING DURING A HOT UPSETTING

*Baryshnikov M.P., Ishimov A.S.\**

*Department technologies of material treatment,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University,  
Magnitogorsk, Russia*

*\* TTSoprano.A@gmail.com*

### Introduction

The processes of hot plastic deformation are quite complex in terms of assessing the impact of various deformation parameters on the flow stress value. In this connection, this paper attempts to establish the function  $\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$ , on the example of structural steel grade 20. Obtaining this kind of data is an urgent task in the mathematical and finite element analysis of pressure treatment processes at elevated temperatures [1].

### Methods

Using the complex of physical modeling Gleeble 3500, the study of high-temperature plasticity of steel 20 was conducted. Cylindrical samples with a diameter of 10 mm and a length of 15 mm were deformed with a strain  $\varepsilon = 0.8$  at deformation temperatures  $T = 1200; 1150; 1100; 1000; 900$  °C and strain rates  $\dot{\varepsilon} = 0.01; 0.1; 0.5; 1; 5$  sec<sup>-1</sup>. The experimental data were processed on the basis of the Arrhenius equation and the Zener-Hollomon parameter [2].

### Results

For steel of grade 20 the family of curves of yield strength at different deformation parameters was obtained. It is established that practically at all deformation regimes except  $T = 900$  °C and  $\dot{\varepsilon} = 5$  sec<sup>-1</sup> graphs of the flow stress on the strain have the form characteristic of the dynamic recrystallization pro-

cess. There is a peak stress value accompanied by softening and reaching the steady-state stress level. On the example of steel grade 20 for the system of equations (1) [3] the numerical values of the main coefficients of this mathematical model are determined.

$$\sigma(\varepsilon) = \left\{ \begin{array}{l} \left[ \sigma_{sat}^2 + (\sigma_0^2 - \sigma_{sat}^2) \exp(-\Omega\varepsilon) \right]^{0.5}, \varepsilon < \varepsilon_c \\ \sigma_p - (\sigma_p - \sigma_{ss}) \cdot \left( 1 - \exp \left[ -K \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_p} \right)^N \right] \right), \varepsilon > \varepsilon_c \end{array} \right\}$$

where  $\sigma_{sat}$  – saturation stress;  $\sigma_0$  – yield stress;  $\Omega$  – deformation hardening parameter;  $\sigma_p$  – peak stress;  $\sigma_{ss}$  – steady-state stress;  $\varepsilon_c$  – critical strain;  $\varepsilon_p$  – peak strain;  $K$  and  $N$  – determine the kinetic of the dynamic recrystallization process.

#### Conclusions

Based on the analysis of experimental data, the numerical coefficients of the mathematical model of rheological properties based on the Arrhenius equation and the ziner-Hollomon parameter are determined.

#### References

1. Luton MJ, Sellars CM (1969) Dynamic recrystallization in nickel and nickel-iron alloys during high temperature deformation. Acta Metallurgica, 17(8), 1033-1043.
2. Poliak EI, Jonas JJ (1995) A one-parameter approach to determining the critical conditions for the initiation of dynamic recrystallization. Acta mater., 44(1), 127-136.
- Laasraoui A, Jonas JJ (1991) Prediction of steel flow stresses at high temperatures and strain rates. Metallurgical Transactions A., 22(7), 1545-1558

УДК 669.1.002.5-192

### **BROADBAND HOT ROLLING MILL BACK-UP ROLLS FAILURE MULTIPARAMETER MODEL AND WAYS TO INCREASE THEIR DURABILITY BASED ON THE KINETIC APPROACH TO THE MATERIAL DESTRUCTION**

*Antsupov A.V.(Jr.), Makarova P.V.*

*Nosov State Technical University, Magnitogorsk, Russia  
polina-makarova95@mail.ru*

This paper is devoted to the actual issue - the required hot rolling mills back-up rolls durability level assurance. Scientific literature analytical dependencies that simulate back-up rolls failure moments for various reasons are un-

der formulation. Thus, elaboration of back-up rolls gradual failure formation complex mathematical model according to various criteria is a timely and a very important problem for the metallurgical engineering theory and practice development. [1]

The the back-up rolls gradual failure formation complex mathematical model is the main scientific result of this paper. It works in the conditions of sequential rolling of a known assortment batch of bands (pic.1).[3] The model represents a set of the interconnected back-up rolls failure partial models for the following reasons:

- bending fatigue strength;
- the surface layer contact fatigue;
- working surface wear resistance.

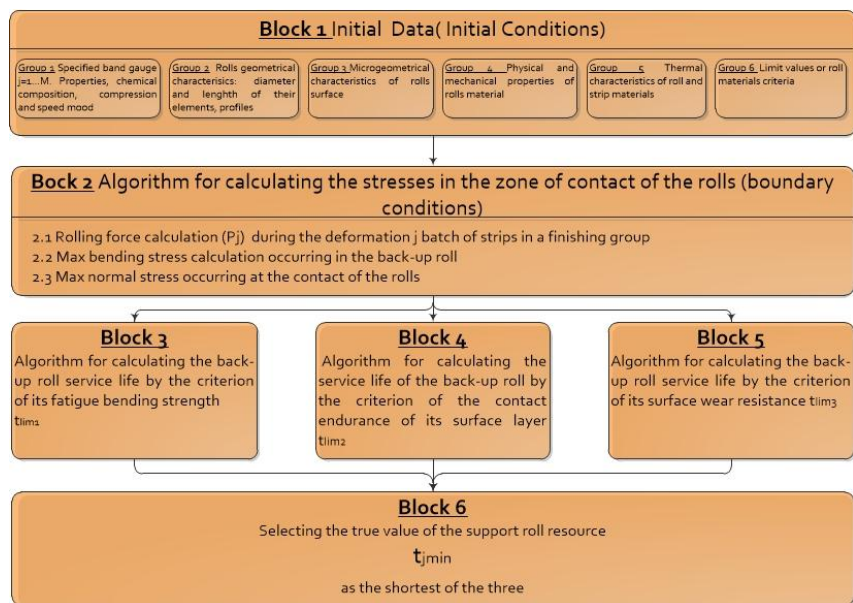


Fig. 1. Block structural diagram of the the back-up rolls failure integrated model

The algorithms and programs for the studied rolls expected life under given operating conditions and tree main criteria were built on the basis of the developed models. These algorithms allow to analyze possible ways of their durability extension. Of great interest are the new theoretical results. These include the first received:

- ratios of the rolls life according to different criteria, determined by the conditions of their operation, the properties of materials and modes of the rolls frictional interaction;

- methods of theoretical search for effective combinations of work rolls initial profiles of and their anti-bend strain to ensure the maximum possible roll in-use life;

- results of rolls durability comparison were made of modern steel grades: AST-70X GontermannPipers (Germany), 18CR3NS Akers (France), MC3-ST2 JSW (Japan), 75XMΦ UZTM (Russia);

- rolls durability buildup coefficients with the use of coolant-lubricated liquids and surfaces impact-friction cladding, allowing to increase the service life of the rolls by 1.17-2.0 times.

The practical significance of this paper is determined by the possibility of practical introduction of the following developments:

- methods and programs for calculating the design life of hot rolling mill back-up rolls by the strength and durability criteria of materials;

- results of theoretical studies, allowing to choose the most effective constructive and technological ways of extending the back-up rolls service life;

- recommendations for the practical implementation of selected methods to increase the back-up rolls durability.

### Reference

1. Methodology of probabilistic assessment of machine elements according to different criteria / A.V. Antsupov, A.V. Antsupov (ml.), V.P. Antsupov, M.G. Slobodiansky, A.M. Oats // Mechanical equipment of metallurgical plants: Interregion. Sat scientific tr. / - Magnitogorsk: Magnitogorsk Publishing House. state those. University, 2012. pp. 28-34.

2. Fedorov V.V. Kinetics of damage and destruction of solids. Tashkent: Fan Publishing House, UzSSR, 1985. 165s.3. Last name and. The name of the article // Journal. - 2012. - V. 1. - № 11. - P. 71-77.

4. Pronikov A.S. Parametric reliability of machines. - M.: Publishing House of Moscow State Technical University. N.E. Bauman, 2002. - 560 p.

5. Salganik V.M., Melzer V.V. Study on the computer of deformations and loads of the quarto roller system: study guide - Sverdlovsk: UPI 1987. - 78 p.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАСТИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛА В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ДЛЯ ТРУБНОЙ СТАЛИ

*Ахмед Аль-Кхузай, Широков В.В., Выдрин А.В.*

*Южноуральский государственный университет, Челябинск, Россия  
asaalkhuzai@mail.ru*

Сопротивление металла пластической деформации является важнейшей характеристикой пластического течения, в частности при обработке металлов давлением. В настоящее время известно довольно много методов расчёта величины сопротивления металла деформации [1, 2].

Однако эти зависимости различаются для случая горячей и холодной деформации. Поэтому их нельзя применять для случая теплой деформации. В рамках разработки единой феноменологической модели были предложены зависимости для определения величины сопротивления деформации [3] в которые входит ряд коэффициентов, учитывающих свойства конкретной марки стали. Для определения численных значений этих коэффициентов была проведена серия испытаний на комплексе GLEEBLE 3800. В частности для трубной стали 32Г2У были получены кривые сопротивления деформации в диапазоне температур от 300 до 1200°C (рис.1).

По результатам экспериментов были определены значения коэффициентов для расчёта величины сопротивления металла при прокатке.

Также были проведены исследования микроструктуры образцов (рис. 2)

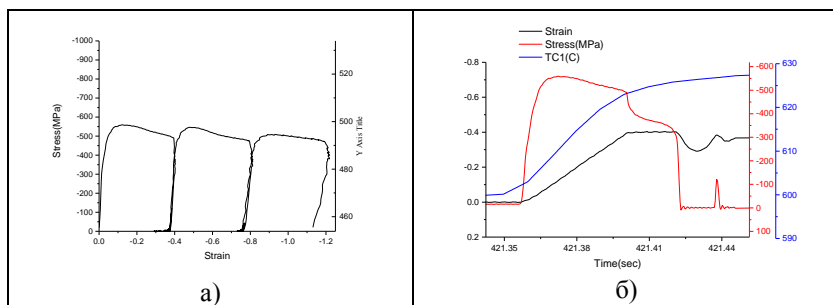


Рис. 1. Результаты испытания на сжатие при температуре 600°C:  
а) изменение сопротивления деформации при дробном нагружении;  
б) изменение значения температуры образца, величин деформации  
и сопротивления деформации во времени



Рис. 2. Микроструктура а) исходная; б) после деформации при 600°С

### Литература

1. Остапенко А.Л., Забира Л.А. Сопротивление деформации сталей при прокатке и методики его расчета // Чёрная металлургия — 2009. — №3 (1311). — С. 54-79.
2. Хензель А., Шпиттель Т. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением: Справ. изд./ Пер. с нем. — М.: Металлургия, 1982. — 360 с.
3. Аль-Кхузаи Ахмед Салим Олейви, Выдрин А.В., Широков В.В. Анализ возможности применения универсальной феноменологической модели сопротивления металла пластической деформации // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением — 2018. — №4 (27). — С. 61-69.

УДК 621.774.35

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ КОНЦЕВЫХ УЧАСТКОВ ПРИ РЕДУЦИРОВАНИИ ТРУБ

*Ахмеров Д.А.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> ОАО «РосНИТИ». Россия, Челябинск, Россия

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ),  
Челябинск, Россия

*ahmerovda@rosniti.ru*

Одной из главных задач, стоящей перед собственниками трубных заводов Российской Федерации, способствующей повышению конкурентоспособности в сегменте рынка бесшовных труб является сокращение производственных издержек при обеспечении высокого качества выпускаемой продукции. Так как в трубном производстве затраты на металл

составляют подавляющую часть издержек, доля которых в структуре общих затрат может составлять до 90%, непрерывное совершенствование должно быть направлено в первую очередь на сокращение потерь металла [1].

В настоящее время для производства бесшовных труб в линии ТПА широкое применение находят непрерывные раскатные станы продольной прокатки [2]. Для расширения сортамента и повышения производительности выпускаемой продукции используются редуционно-растяжные и калибровочные станы, на которых происходит окончательное формирование толщины стенки и наружного диаметра. Однако, в процессе редуцирования на трубных плетях образуются утолщенные концевые участки, приводящие к увеличению длины концевой обрезки, а следовательно, и повышению РКМ и издержек производства. В связи с этим, актуальной задачей является разработка мероприятий, способствующих снижению длины утолщенных концевых участков трубных плетей.

При анализе научно-технической литературы были определены основные направления и технические решения по уменьшению длины некондиционных концевых участков. Однако, известные зависимости для определения длины утолщенных концевых участков описывают только конкретный стан. При этом наличие эмпирических коэффициентов требует дополнительной адаптации. В связи с этим приоритетным направлением является разработка математических моделей, описывающих характер формоизменения на основе компьютерного и физического моделирования процесса редуцирования труб.

В данной работе представлены основные результаты, полученные на основе проведения компьютерного моделирования с использованием лицензионного программного продукта «QFORM 2D/3D×64», которое позволило:

- определить характер распределения толщины стенки по длине трубных плетей;
- определить влияние коэффициента пластического натяжения на изменение толщины стенки;
- определить граничные условия при которых происходит утонение и утолщение стенки;
- определить влияние частоты вращения валков в предшествующих клетях на характер изменения толщины стенки.

### **Литература**

1. Селецкий Э.Б. Совершенствование управления расходом металла в трубном производстве [Текст] / автореферат дис. Э.Б. Селецкий канд. экон. наук: 08.00.05; Урал. гос. техн. ун-т - УПИ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2010. – 25 с.2.

2. Шкуратов Е.А. Оптимизация процесса непрерывной раскатки гильз с целью повышения точности горячекатаных бесшовных труб [Текст] / дис. Е.А. Шкуратов канд. техн. наук: 05.16.05 «Обработка металлов давлением»: защищена 13.12.2017. – Ч., 2017. – 166 с.

УДК 621.77

## **ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТА ПРОШИВНОГО СТАНА**

*Больных М.В., Орлов Г.А., Больных К.В.  
ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»  
Екатеринбург, Россия  
maria.bolnykh@yandex.ru*

Снижение себестоимости производства труб является актуальной задачей, так как уменьшение затрат повышает конкурентоспособность продукции на рынке [1]. Цель данной работы - сокращение затрат на производство труб путем увеличения ресурса использования оправок, применяемых на прошивном стане ТПА-80; уменьшения количества несоответствующих труб.

В большинстве случаев срок службы оправки прошивного стана ограничен в связи со следующими причинами: пластической деформации поверхностного слоя и образованием трещин по телу оправки [2].

На практике выявлена зависимость стойкости прокатного инструмента от марки прокатываемой стали. Наименьшая стойкость - 64 прошивки, характерна для стали 12Х1МФ.

Механизм выхода из строя оправок - пластическая деформация, смещение материала носика. Пластическая деформация возникает, если предел текучести материала оправки резко снижается вследствие повышения температуры относительно напряжений, передаваемых от заготовки. Зависимость предела текучести материала оправки 35ХН2Ф от температуры представлена на графике (рис. 1).



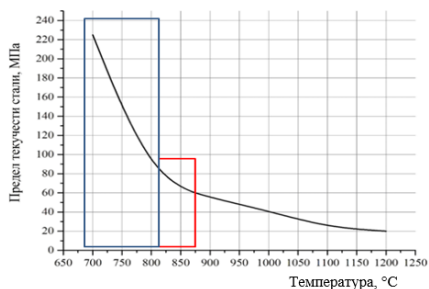


Рис. 1. График зависимости предела текучести стали 35ХН2Ф от температуры

На рис. 1 синей рамкой выделен температурный интервал при прокатке углеродистых марок стали; красной - значительное снижение предела текучести при прокатке труб из стали 12Х1МФ. Причинами роста температуры являются: увеличение величины выдвигания оправки на 10-15 мм; увеличение передаваемых напряжений при прошивке заготовки из трудно деформируемой марки стали. Предложено возможное решение проблемы: делить весь объем кампании проката труб из стали 12Х1МФ на позиции по 100-150 труб, между которыми прокатывать 70-100 труб из углеродистой стали (т.е. ввести так называемые «прослойки» для обкатки оправок).

При отработке технологии определена необходимость увеличения установки при обкатке в «прослойку» аналогично марки стали 12Х1МФ. Проведено исследование микроструктуры и свойств образцов, отобранных с оправок с обычной и с увеличенной установкой.

На рис. 2 приведены фотографии структуры оправок, обкатанных с различными установками.

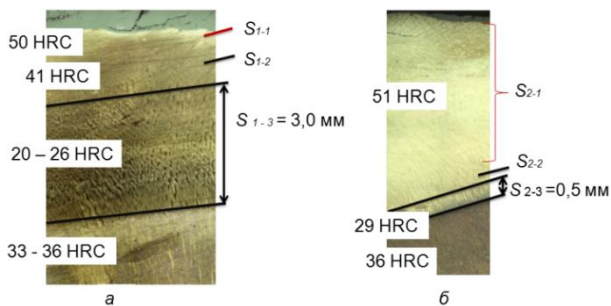


Рис. 2. Микроструктура образцов носика оправок: а – оправка №1 (обкатка с обычной установкой), б – оправка №2 (обкатка в «прослойку» с увеличенным выдвиганием)

В первой зоне оправки №1 (сечение 1-1, рис. 2а) твердость максимальная - 50 HRC, что превышает исходную твердость тела оправки - 36 HRC. Во второй зоне (1-2) твердость немного ниже. В третьей зоне (1-3) твердость минимальная - 26 HRC. При этом величина ее достигает 3 мм, а на оправке №2, обкатанной с увеличенной установкой, практически весь слой (сечение 2-1) прошел полное фазовое превращение и достигнута максимальная твердость (рис. 2б). Толщина слоя (2-2) с минимальной твердостью - менее 0,5 мм, это объясняется тем, что при обкатке с увеличенной установкой носик оправки (оправка №2) разогревается до температуры выше критических точек. Для материала оправки они составляют 750 и 820 °С. В случае с оправкой №2 температура является достаточной для полного фазового превращения.

В результате реализации предложенных мероприятий увеличена стойкость оправок с 64 до 147 прошивок и достигнута стабильная стойкость оправок - не менее 122 прошивок.

#### **Литература**

1. Данченко В.Н., Коликов А.П., Романцев Б.А., Самусев С.В. Технология трубного производства: Учебник для вузов/ Данченко В.Н., Коликов А.П., Романцев Б.А., Самусев С.В. – М.:Интернет Инжиниринг, 2002. – 640с.

2. Осадчий В.Я., Вавилин А.С., Зимовец В.Г., Коликов А.П. Технология и оборудование трубного производства / Осадчий В.Я., Вавилин А.С., Зимовец В.Г., Коликов А.П. – М.: Интернет Инжиниринг 2007. – 560с.

УДК 621.77

### **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОКАТКИ ТРУБ НА ТПА-140**

*Больных М.В., Орлов Г.А., Больных К.В.  
ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
Екатеринбург, Россия  
maria.bolnykh@yandex.ru*

Основная особенность ТПА-140 – это осуществление двух проходов продольной прокатки на в последовательно расположенных станах СПП и последующая прокатка в трехвалковом обкатном стане [1].

Характерными для станов продольной прокатки являются дефекты видов: продольные риски и выход толщины стенки за пределы допускаемых отклонений.

Образование риски обусловлено особенностями продольной про-

катки на короткой неподвижной оправке. Анализ работы станов СПП показывает, что основным фактором, определяющим условия образования дефекта «прикатанная риска», является условия формоизменения металла [2].

Немаловажную роль в образовании «риски» играют такие факторы, как износ оправок и перекося оправки в результате изгиба стержня. Устранение данных факторов позволит так же снизить несоответствия по толщине стенки.

В работе рассматриваются следующие пути, позволяющие устранить выше обозначенную проблему:

- 1) оптимизация калибровки оправки, позволяющая повысить ее стойкость;
- 2) модернизация выходной стороны стана для обеспечения центрирования оправки в калибре.

В большинстве случаев срок службы оправки ограничен одним из трех механизмов выхода из строя:

- 1) пластическая деформация поверхностного слоя оправки;
- 2) образование трещин, разрушение;
- 3) механический износ поверхности или налипание металла.

Известны следующие способы, позволяющие повысить стойкость инструмента:

- 1) оптимизация калибровки;
- 2) улучшение условий работы;
- 3) повышение эксплуатационных свойств материала инструмента.

В работе методом конечных элементов проведено моделирование процесса прокатки черновой трубы в СПП-2 размером 108х5 мм из марки стали 09Г2С. Размеры черновой трубы приняты фактические с отобранных проб. В результате выявлено две зоны (рис. 1а) с повышенной концентрацией напряжений: по торцу и в месте перехода конической в цилиндрическую часть оправки.

Чтобы снизить интенсивность напряжений, увеличили радиус скругления с 5 мм до 10 мм, что позволило снизить интенсивность действующих напряжений по торцу со 180 до 120 МПа (рис. 1б), при этом на оправке с радиусом 10 мм по торцу отсутствует «скачок» напряжений.

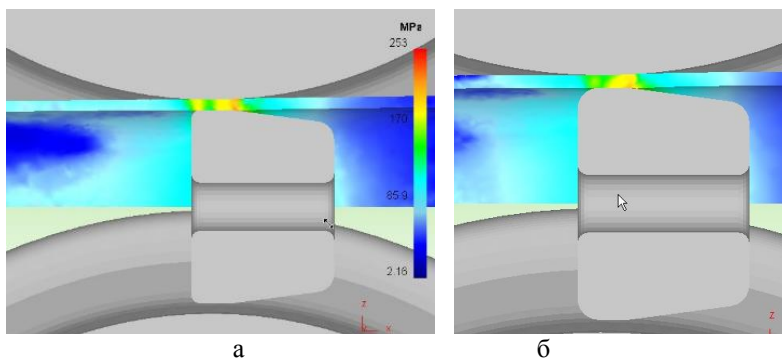


Рис. 1. Фрагмент моделирования прокатки черновой трубы в СПП-2

Центрирование стержня оправки на выходной стороне стана осуществляется первой центрирующей парой на расстоянии 4,4 м, поэтому стержень провисает под собственной массой. Контакт оправки с валком приводит к дополнительному износу ручья калибра нижнего валка. Перекос в узле установки оправки может быть вызван наличием зазоров и изгибом стержня.

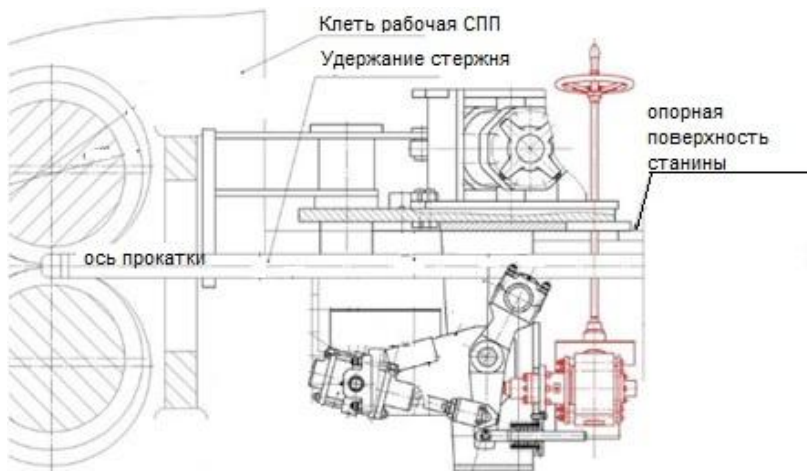


Рис. 2. Схема устройства новой конструкции

Разработана конструкция (рис. 2) устройства поддержки стержня. Поддерживающий рычаг перемещается с помощью ПЦ. Настраивается с помощью редуктора со штурвалом. Устройство прошло промышленные испытания, заменен подшипник ролика. В настоящий момент устройство

успешно используется.

### **Литература**

1. Данченко В.Н., Коликов А.П., Романцев Б.А., Самусев С.В. Технология трубного производства: Учебник для вузов/ Данченко В.Н., Коликов А.П., Романцев Б.А., Самусев С.В. – М.:Интермет Инжиниринг, 2002. – 640 с.

2. Осадчий В.Я., Вавилин А.С., Зимовец В.Г., Коликов А.П. Технология и оборудование трубного производства / Осадчий В.Я., Вавилин А.С., Зимовец В.Г., Коликов А.П. – М.: Интермет Инжиниринг 2007. – 560 с.

## ВЛИЯНИЕ НАТЯЖЕНИЯ НА НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И ЗАПАС РЕСУРСА ПЛАСТИЧНОСТИ ПРИ ПРОКАТКЕ

**Водопьянова О.В.\***, **Непрыхин С.О.**

*ФГАОУ «Уральский федеральный университет»,*

*Екатеринбург, Россия*

*\*ol.vodopianova@gmail.com*

В работе была произведена оценка деформируемости металла в одинаковых условиях (непрерывная прокатка полосы в трех клетях, с калибровкой овал-круг-овал, деформирующий инструмент – идеально жесткие валки, материал заготовки сталь AISI 1025, температура заготовки 1030°C), при различных скоростных режимах: согласованный, с натяжением (снижение скорости в первой клетке на 5%, 10% и повышение скорости в третьей клетке на 5%, 10%), с подпором (повышение скорости в первой клетке на 5%, 10% и снижение скорости в третьей клетке на 5%, 10%), передний подпор и заднее натяжение, заднее натяжение и передний подпор. Для этого в программном комплексе DEFORM 3D в очаге деформации были сняты следующие характеристики: strain effective ( $\varepsilon_i$ ), stress effective ( $\bar{\sigma}$ ), stress mean, strain rate effective ( $\dot{\varepsilon}$ ).

В настоящее время для оценки НДС в процессах обработки давлением чаще всего используют предложенный В.Л. Колмогоровым показатель напряженного состояния [1-4] в виде:

$$k = \frac{\sigma}{T}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – среднее нормальное напряжение (гидростатическое давление);  $T$  – интенсивность касательных напряжений сдвига в главных осях. То есть  $k$  показывает уровень сжимающих (при  $k < 0$ ) или растягивающих напряжений (при  $k > 0$ ) в некоторой точке деформируемого материала. Реже вместо параметра  $T$  используют понятие эффективного напряжения  $\bar{\sigma}$ , зависимость между которыми имеет вид  $\bar{\sigma} = \sqrt{3} \cdot T$ .

Интенсивность скоростей деформации имеет следующую зависимость от эффективной скорости деформации

$$N = \sqrt{3}\dot{\varepsilon} \quad (2)$$

Для оценки деформации используют величину интенсивности деформаций сдвига  $L_i$ . Между степенью деформации сдвига  $L_i$  и  $\varepsilon_i$  также существует связь [5]

$$\varepsilon_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \Lambda_i. \quad (3)$$

Пластичность стали AISI 1025 зависит от температурно-скоростных условий деформирования и показателя напряженного состояния, данная зависимость приведена в уравнении регрессии (4) [6]

$$\Lambda_p = 2,58 + 3,1 \left( \frac{\theta}{1000} \right)^2 - 0,73 \frac{\theta}{1000} \ln \frac{H}{\sqrt{3}} - 0,65 \frac{\sigma}{T} + 0,1 \frac{\sigma}{T} \ln \frac{H}{\sqrt{3}}, \quad (4)$$

где  $\theta$  – температура деформации.

Таким образом, рассчитав  $\Lambda$  можно оценить степень деформируемости металла (ресурс пластичности  $\psi$ ) при прокатке в различных калибрах из ограничения [1]

$$\psi = \Lambda / \Lambda_p < 1. \quad (5)$$

С целью оценки степени деформируемости на основе моделирования были определены: степень использования ресурса пластичности, для различных скоростных режимов при прокатке, усредненные значения показателя напряженного состояния  $k$  и накопленной степени деформации  $\Lambda_p$ , характерные для линий течения материала полосы вдоль длины очага деформации в центре раската, боковой поверхности в раземе калибра и на контактной поверхности.

Параметр  $k$  имеет наибольшее значение на боковой поверхности, а наименьшее – на контактной, что связано с превалированием на них соответственно растягивающих и сжимающих напряжений [5]. Из данных результатов расчетов  $\psi$  следует, что на боковой поверхности ресурс пластичности стали AISI-1025 используется в среднем на 8,4...10,4 %, на контактной на 10,8...20,7% а в центре полосы на 11...11,9 %. Поэтому, даже принимая во внимание залечивание деформационной поврежденности при статической рекристаллизации [6], можно ожидать значительного истощения пластических свойств в многопроходном процессе.

### **Выводы**

Анализ результатов показывает, что в целом наибольшая деформируемость будет при скоростном режиме заднее натяжение и передний подпор 5%, наименьшая – при заднем подпоре 5%, на контактной поверхности  $\psi$  равно 0,207 и 0,108 (снижение на 9,9%) соответственно.

### **Литература**

1. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров. – Екатеринбург: Изд-во Уральского ГТУ, 2001. – 836 с.

2. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. – Киев: Вища школа, 1983. – 174 с.
3. Саломыкин В.В. Оценка калибровки валков по ресурсу пластичности металла и энергетическим затратам на деформацию // Сталь. – 2014.– № 7. – С. 56 – 58.
4. Румянцев М.И. К вопросу учета ограничения по деформируемости металла при разработке режимов холодной прокатки / М.И. Румянцев // Калибровочное бюро. – 2014. – № 4. – С.33 – 43.
5. Постыляков А.Ю., Инатович Ю.В., Логинов Ю.Н., Сравнительный анализ деформируемости металла при прокатке в калибрах простой формы// Производство проката – 2019. – №2. – с. 12-1
6. Колмогоров В.Л. Пластичность и разрушение / В.Л. Колмогоров, А.А. Богатов, Б.А. Мигачев и др. – М.: Металлургия, 1977. – 336 с.

УДК 621

## **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В КРУГЛОЙ ЗАГОТОВКЕ НА СТРУКТУРУ И РАСКОЛ МЕЛЮЩИХ ШАРОВ**

*Галимьянов И.К.*

*АО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат»,  
Нижний Тагил, Россия*

*e-mail*

При производстве мелющих шаров используется круглая заготовка. При прокатке на шаропрокатном стане деформация металла производится в валках с винтовыми калибрами. Указывается влияние макроструктура заготовок на качество и эксплуатационные свойства шаров. Приведены технологические параметры производства мелющих шаров.

Шары мелющие используются в шаровых мельницах предназначены для помола различных рудных и нерудных полезных ископаемых, строительных материалов средней твердости. В зависимости от прочностных характеристик измельчаемых материалов для помола используются мелющие тела соответствующей твердости и износостойкости.

На АО «ЕВРАЗ НТМК» действуют два участка по производству мелющих шаров ШПС КСЦ (крупносортного цеха) и ШПС РБЦ (рельсоболочного цеха). Состав основного оборудования практически аналогичный (нагревательные печи, шаропрокатные станы, закалочный барабан). На ШПС РБЦ установлен новый тип оборудования и дополнительно отпуская печь для снятия внутренних напряжений мелющих шаров. На ШПС КСЦ производится самотпуск шаров в бункерах с теплоизоляционными крышками.



В соответствии с требованиями потребителя расколы шаров не допустимы. При производстве мелющих шаров на АО «ЕВРАЗ НТМК» шаровая заготовка, предназначенная для шаров 2 группы твердости по ГОСТ 7524-2015 ранее не подвергалась противодождевой обработке (вакуумированию). Химический состав стали приведен в таблице 1.

Таблица 1 Химический состав стали

Группа твердости по ГОСТ 7524 (категория)	Массовая доля основных химических элементов, %				
	Углерод	Кремний	Марганец	Сера	Фосфор
				не более	
2	0,60-0,69	0,17–0,37	0,70–0,90	0,025	0,025

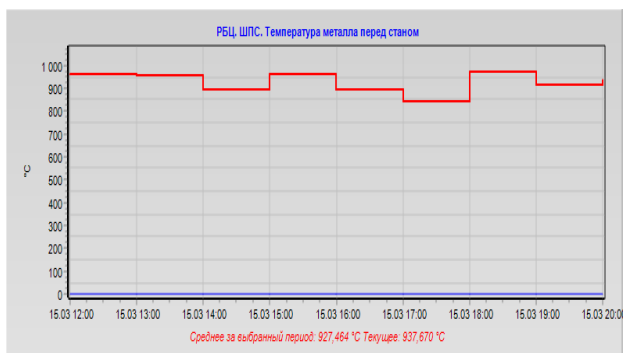


Рис. 1. РБЦ, ШПС. Температура металла перед станом

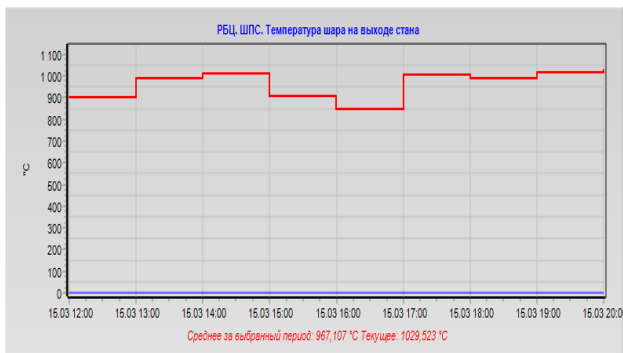


Рис. 2. РБЦ, ШПС. Температура шара на выходе стана

При производстве мелющих шаров на ШПС КСЦ закалка шаров производится подстуживание шаров на ковшевом конвейере перед закалкой. Закалка шаров производится на закалочном барабане до темпе-

температуры 200-290°C, затем производится отпуск в отпускной печи температура отпуска 280-360°C. При производстве мелющих шаров из непрерывно-литой заготовки без вакуумирования на старом стане не отмечалось выявление трещин и расколов.

При производстве мелющих шаров на ШПС РБЦ подстуживание производится на лоточном конвейере перед закалкой (Рис 3). Закалка шаров производится на закалочном барабане до температуры 10-20°C (Рис 4), затем производится отпуск в отпускной печи температура отпуска 230-250°C (Рис. 5).

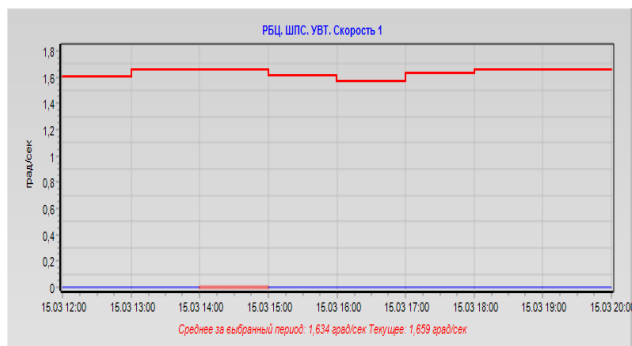


Рис. 3. РБЦ, ШПС, УВТ. Скорость 1

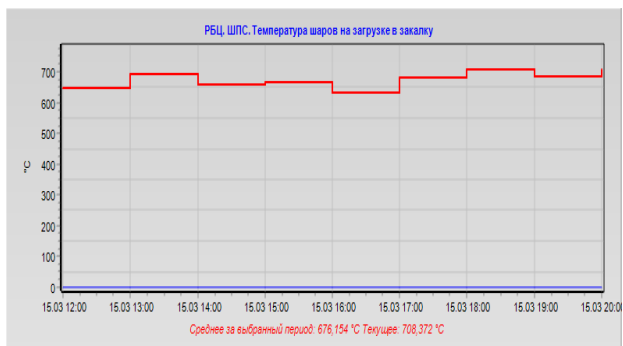


Рис. 4. РБЦ, ШПС. Температура шаров на загрузке в закалку

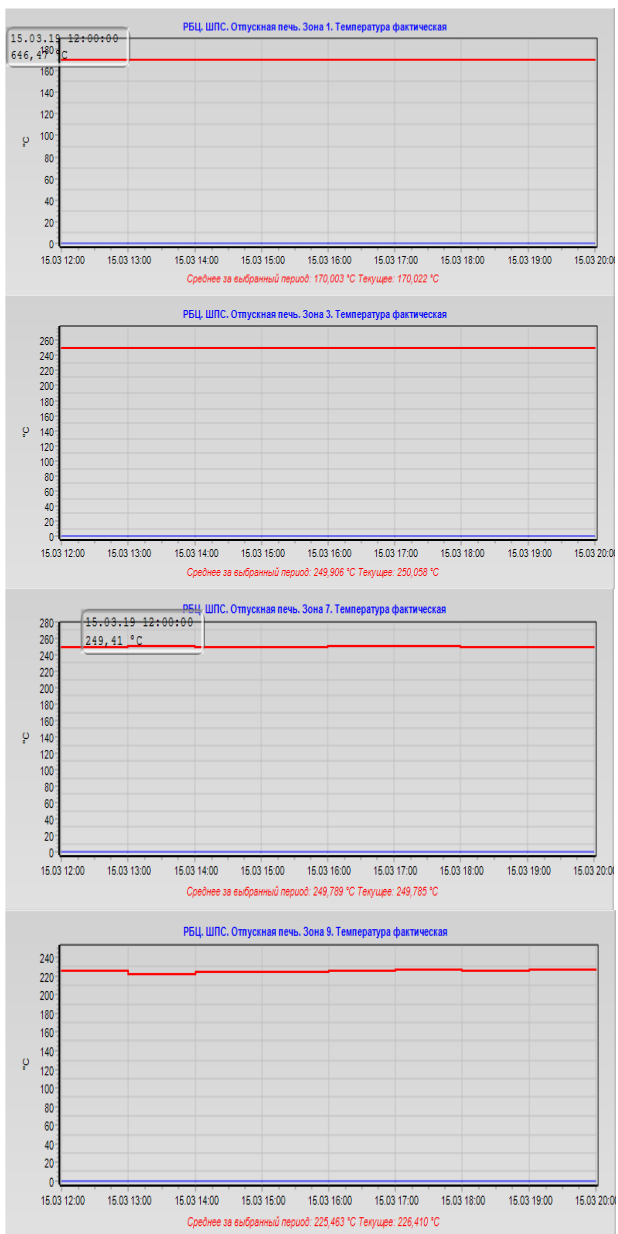


Рис. 5. РБЦ, ШПС. Фактическая температура в различных зонах

При производстве мелющих шаров из непрерывно-литой заготовки без вакуумирования на новом стане выявляются трещины и расколы шаров при испытании шаров на ударостойкость. В макроструктуре шаров и шаровой заготовки выявлены флокены. При прохождении шаров в закалочной установке и полном остывании мартенситная структура металла при наличии флокенов приводит к возникновению внутренних трещин.

Макроструктура представлена на рис. 6.

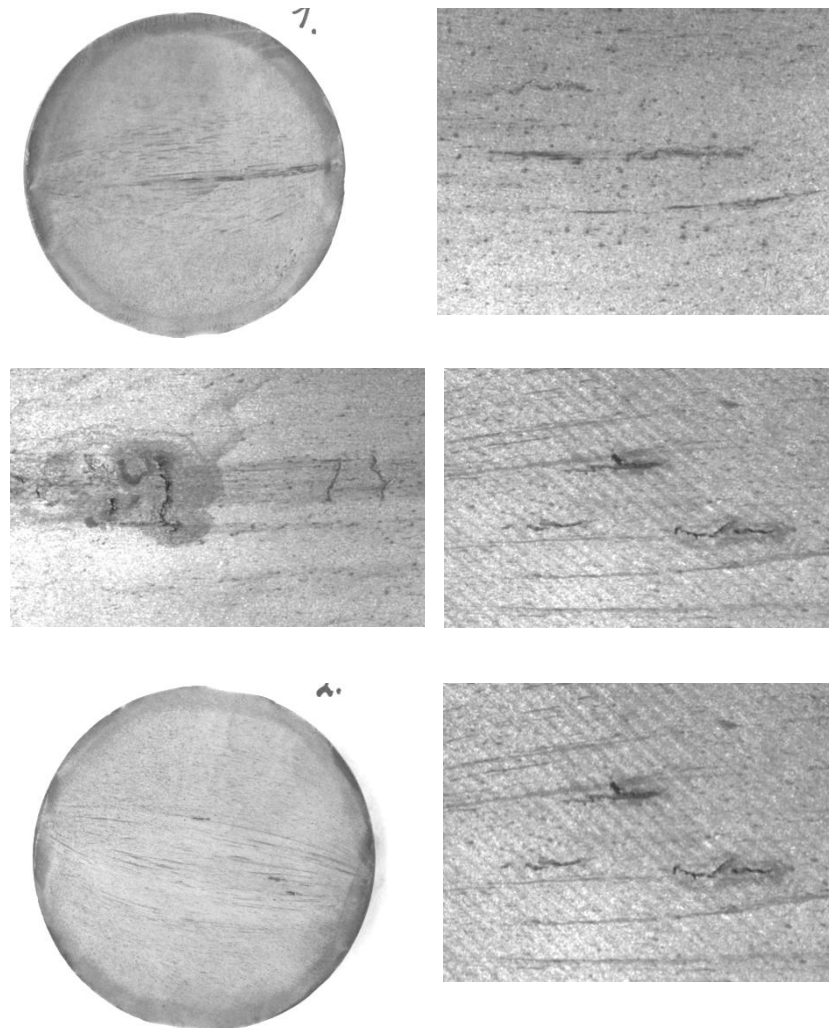


Рис. 6. Макроструктура материала шаров после их прохождения в закалочной установке и полного остывания

На всех темплетях в центральной части выявлены внутренние дефекты, представляющие собой тонкие извилистые трещины длиной до 30 мм, беспорядочно ориентированные. По результатам исследования качества макроструктуры проб от двух шаров, двух заготовок шаровых диаметром 120 мм, изготовленных на новом шаропрокатном стане рельсобалочного цеха, выявлено наличие на всех пробах недопустимых дефектов макроструктуры - флокенов.

Твердость в закаленном слое шаров измерялась методом Роквелла. Результаты измерений представлены в таблице 2.

Таблица 2. Твердость в закаленном слое шаров

№ образца	Твердость закаленного слоя, HRC
Полусфера №1	50,5-50,0-51,0-52,5
Полусфера №2	52,5-50,5-52,0-52,0

По результатам выявленных факторов принято решение проводить полное вакуумирование металла предназначенного для производства мелющих шаров на новом шаропрокатном стане рельсобалочного цеха.

Вывод. Температура конца закалки влияет на возникновение внутренних трещин мелющих шаров при наличии флокенов. При остывании шаров с флокенами ниже температуры 200-250°C существенно увеличивается риск появления трещин и расколов.

#### Литература

1. Прокатное производство. Справочник . Т. 2./Под ред.п реп. Е.С. Рокотяна —М.: Металлургиздат, 1962. - 315 с.
2. Специальные прокатные станы/А.И. Целиков, М.В. Барбарин, М.В. Васильчиков и др. —М.: Металлургия, 1971. - 336 с.
3. Поперечная прокатка в машиностроении/ В.С. Смирнов, В.П. Анисифоров, М.В. ВасильчиковН пр. — М.: Машгиз, 1957. — 376 с.
4. Шор Э.Р. Новые процессы прокатки – М: Metallurgizdat, 1960.-386 с.
5. Грановский С.П. Новые процессы и станы для прокатки изделий в винтовых калибрах. —М.: Металлургия, 1980.
6. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. М.: Металлургия, 1983.
7. Васильчиков М.В. Оборудование для прокатки изделий сложной формы. – М.: Машиностроение, 1963. – 385 с.
8. Целиков А.И., Барбич М.В. и др. Специальные прокатные станы. М.: Металлургия, 1979. - 336 с.
9. Перов В.А., Андреев Е.Е., Биденко Л.Ф. Дробление, измельчение и грохочение руд. М.: Недра, 1990. 301 с.

10. Кирюшин А.В., Шестаков И.А. Влияние твердости шаров на измельчения руд в шаровых мельницах // Обогащение руд. 1990. №5 3-4 с.

11. Вавилкин Н.М., Челноков В.В. К выбору материала для производства мелющих шаров// Изв.вузов. Черная металлургия. 2002. №1. С 41-46.

12. Игнатов В.А., Солёный В.К., Ярмоленко А.И. и др. Выбор и разработка рациональной формы мелющего тела для измельчения сырья и материалов // Металл и литье Украины. 2002. № ½. С 23-27.

13. Дюбин Н.П., Заниес А.Н., Цилевич И.З. и др. Производство помольных шаров на заводе «Азовсталь» // Металлургическая и горнорудная промышленность. 1962. №4. С. 77-81.

14. Зеликович А.Я., Токмаков А.М. Улучшение качества термически обработанных шаров // Сталь. 1994 № 2. С 64-65.

УДК 621

## **ПРИПОЙ ПОИН-52: ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ МЕЛКОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРОВОЛОКИ**

*Глебов Л.А., Радионова Л.В., Фаизов С.С.*

*ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский институт)», Челябинск, Россия  
79193293392@yandex.ru*

В последние годы достаточно активно ведутся работы, посвященные способам и технологиям пайки с использованием бессвинцовых припоев. Вызвано это тем, что в 2006 году Директива Европейского Союза по экологической безопасности RoHS (Restriction of use of Certain Hazardous Substances) ограничила использование свинца в новом электрическом и электронном оборудовании на величине не более 0,01%. Эти ограничения установлены не от веса изделия, узла или компонента, а от каждого отдельного гомогенного материала [1,].

Легкоплавкий (температура плавления 120 °С) припой ПОИн-52 (индий 52%, олово 48%) является одним из наиболее часто используемых по состоянию на 2016 г (после введения ограничений на использование кадмия и свинца) в полупроводниковой технике [2].

Индий представляет очень незначительный процент земной коры, его концентрация сопоставима с серебром, которая составляет около 0,1 части на миллион. Индий является важным побочным продуктом операций по обработке металлического цинка.

Целью настоящей работы являлась разработка технологического процесса получения проволоки малого сечения (диаметром от 1,8 до 3 мм) из сплава ПОИи-52 в условиях мелкосерийного производства.

Традиционно проволоку такого сечения получают методом волочения в монолитных волокнах. Однако мелкосерийность производства и особенности заготовки, получаемой разливкой в изложницы, продиктовали необходимость искать более эффективные и конкурентоспособные технические решения.

При выборе процесса изготовления проволоки различных диаметров и разработке технологии в качестве инструмента нами был выбран специализированный пакет для компьютерного моделирования QForm. Сплав In-Sn имеет высокую пластичность и низкое значение временного сопротивления разрыву (11,9 МПа) [3,4]. В ходе компьютерного моделирования было установлено, что процесс прямого прессования проволоки диаметрами 1,8...3,0 мм возможен из заготовки диаметром 20,0 мм даже при комнатной температуре. При этом суммарный коэффициент вытяжки  $\mu$  будет составлять 45...125 в зависимости от диаметра проволоки.

Для реализации процесса из имеющегося в нашем распоряжении оборудования нами был выбран модернизированный гидравлический пресс марки Д2430 и разработана специальная оснастка в основе которой лежит монолитная волока нужного нам диаметра.

При отработке технологии и выпуске опытной партии нами установлено, что процесс является высокопроизводительным, скорость истечения готовой проволоки может достигать  $V_{ист} = 0,5 \dots 1,0$  м/с при и позволяет получить готовую продукцию высокого качества как по геометрическим характеристикам, так и по качеству поверхности.

На (рис. 1, а) изображена литая заготовка сплава ПОИи-52 размерами: диаметр 20 мм, длина 100 мм, на (рис. 1, б) готовая проволока диаметром 2,0 мм массой 100 г. на пластиковой катушке.



Рис. 1. Сплав ПОИи-52:

а) литая заготовка; б) готовая проволока диаметром 2,0 мм

Таким образом, в ходе компьютерного моделирования была предложена конкурентоспособная технология производства припоя ПОИп-52 в виде проволоки диаметром 1,8...3,0 мм, спроектирована и изготовлена оснастка для ее производства и выпущена опытная партия высококачественной продукции в количестве 10 кг.

#### Литература

1. Курмаев М.Н. Бессвинцовый припой на основе олова /Курмаев М.Н., Волков А.А., Перевезенцев Б.Н. // Актуальные проблемы современного машиностроения: сборник трудов Международной научно-практической конференции / Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – С. 414-416.
2. Зенин В.В. Разработка и исследование бессвинцовых припоев для пайки кристаллов силовых полупроводниковых приборов / Зенин В.В., Бойко В., Кастрюлев А., Ткаченко А., Хишко О. // Технологии в электронной промышленности, № 8, 2008. – С. 52-56
3. Шепелевич В.Г. Фазовый состав, микроструктура и микротвердость быстрозатвердевших сплавов системы «Индий – Олово» / Шепелевич В.Г., Ван Цзинцзе (КНР), Щербаченко Л.П. // Новости науки и технологий, № 1, 2017. – С. 48-53.
4. Шевелев, А.И. Особенности прессования оловянно-свинцовых сплавов с высокими степенями вытяжки / Шевелев А.И., Сынков, С.Г. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: металургія. Випуск 73 - Донецьк, ДонНТУ, 2004. – С. 100-105.

УДК 621

### **ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ЯЧЕЙСТОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ НЕРАВНООСНОМ ВЫПОЛНЕНИИ ЯЧЕЕК НА СВОЙСТВА КОНЕЧНОГО ИЗДЕЛИЯ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА**

*Грехов С.К., Логинов Ю.Н.*

*ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»,  
Екатеринбург, Россия  
g.svyat@yandex.ru*

Управляемая регенерация тканей приобрела большое значение в области ортопедической тканевой инженерии, поскольку потребности и технологии позволяют разрабатывать индивидуальные решения для протезирования. Успешные каркасы для управляемой регенерации тканей должны отвечать трем основным требованиям: обеспечивать необходимую архитектуру имплантата, способствовать росту новых тканей, а так-



же обеспечивать правильное функционирование при специфической механической нагрузке. Первые две проблемы были успешно решены с помощью стандартных методов изготовления изделий [1].

Третья проблема обусловлена строением человеческого организма. Кость человека обладает анизотропией в продольном и поперечном направлениях и это нужно учитывать при проектировании имплантата, чтобы избежать травмирования организма и реакции «Stress shielding». Данные о механических свойствах кортикальной кости представлены в работе [2].

Применение аддитивных технологий предоставляет возможность создавать ячеистые изделия из определенного перечня материалов с различной контролируемой архитектурой ячеек. Это дает возможность влиять на механические свойства материала, создавать изделия с анизотропией свойств, в частности это касается модуля упругости [3].

Испытание ячеистых структур на сжатие производится согласно стандарту ISO 13314:2011. Для симуляции этого вида испытаний методом конечных элементов применили программный комплекс ABAQUS. Исследуемый материал обладает свойствами сплава Ti-6Al-4V, часто используемого в медицине. Рассматривалось плоское деформированное состояние для упрощения решения. Постановка задачи подробно изложена в статье [4].

В результате моделирования нагружения ячеистых структур разной архитектуры удалось построить график, представленный на рисунке 1, здесь же представлена геометрия ячеек, которая была использована в данной работе.

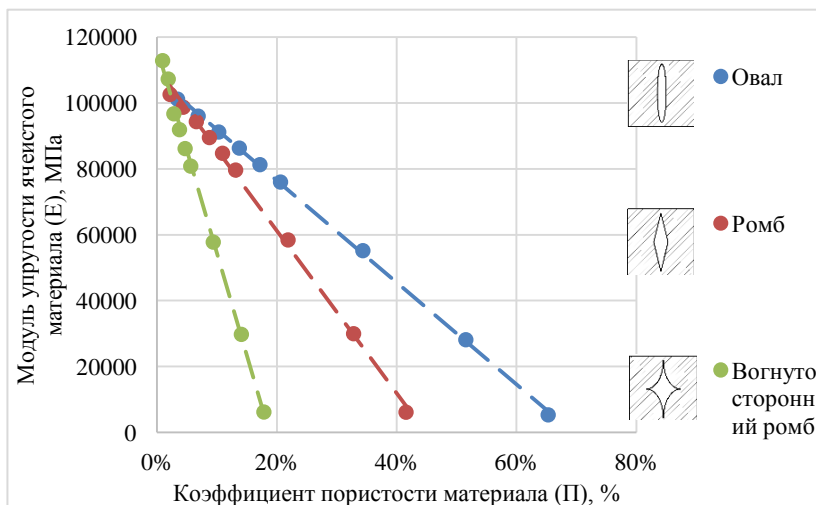


Рис. 1. График зависимости модуля упругости от пористости материала

Полученные данные подтверждают утверждение о том, что на механические свойства материала можно влиять не только за счет изменения пористости материала, но также и за счет изменения архитектуры ячеек материала. При этом наиболее широким диапазоном изменения пористости обладает «овал». Этот вариант геометрии ячеек так же лишен концентраторов напряжений, обусловленных строением ячейки.

#### Литература

1. Wettergreen M. A. et al. Creation of a unit block library of architectures for use in assembled scaffold engineering //Computer-Aided Design. – 2005. – Т. 37. – №. 11. – С. 1141-1149.
2. Bansiddhi A., Dunand D. C. Titanium and NiTi foams for bone replacement // Bone Substitute Biomaterials. – 2014. – P. 142–179.
3. Loginov, Yu. N. Determining the Young's modulus of a cellular titanium implant by FEM simulation / Yu. N. Loginov [et al.] // AIP Conference Proceedings. – 2017. – 1915, 030010
4. Loginov Y. N. Properties Anisotropy of Additive Manufactured High-Porous Titanium Alloy with Non-Equiaxial Cellular Structure / Y. N. Loginov, S. I. Stepanov, S. K. Grekhov // Materials Science Forum. – Trans Tech Publications. – 2019. – V. 946. – P. 984–989.

УДК 621.771.09

### ПОВЫШЕНИЕ ПЛАСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖЕСТИ НЕПРЕРЫВНОГО ОТЖИГА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ В УСЛОВИЯХ ПАО «ММК»

*Губанов С.А.<sup>1</sup>, Чикишев Д.Н.<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup> ПАО «ММК», Магнитогорск, Россия*

*<sup>2</sup> Магнитогорский государственный технический  
университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия  
gubanov@inbox.ru*

На данный момент существует проблема в получении несоответствующей продукции по механическим свойствам на жести (ЧЖК и ЭЖК). Несоответствия заключаются в получении высоких значений твердости по Супер-Роквеллу HR30Та и низких значений глубины лунки по Эриксену, IЕ. При анализе микроструктуры несоответствующей продукции, была отмечена следующая закономерность: крупный балл структурно-свободного цементита (4 балл, на отдельных образцах до 5 балла). Характер распределения цементита преимущественно в виде цепочек (Ряд Б по ГОСТ 5640-68), реже встречается цементит расположенный на границах зерен (Ряд А по ГОСТ 5640-68). Цементит, будучи очень твердой фазой, значительно снижает пластические характеристики.

Местом воздействия в технологической цепочке на характер распределения цементита, был выбран участок ускоренного охлаждения перед смоткой полосы на широкополосном стане 2000. Текущая схема охлаждения на отводящем роллганге предполагает использование коллекторов охлаждения ближе к моталкам. Такая схема выбрана не случайна и служит для максимального выделения нитридов при охлаждении, с целью снижения эффекта старения уже на готовой жести.

Для уменьшения балла цементита была предложена схема охлаждения со смещением включенных коллекторов в сторону клетей. Для компенсации сниженного количества связанного азота, был изменён химический состав стали с повышением содержания алюминия и обеспечением показателя  $Al/N$  на уровне не менее 10.

По опытной схеме охлаждения было произведено 63 т жести. Анализ микроструктуры горячекатаного подката и готовой жести показал, что балл структурно-свободного цементита на горячекатаном подкате лежит в диапазоне 2-3 (ср. балл 1,6). При этом, распределение цементита на всех образцах по границам зерен (Ряд А). Согласно схемы отбора проб, образцы, отобранные с середины горячекатаного рулона, имеют цементит 2 балла. На образцах, отобранных с концов, цементит несколько крупнее. Это говорит о разности условий охлаждения по длине рулона.

Из двух экспериментальных горячекатаных рулонов произведено 4 рулона жести. Все 4 рулона годные и соответствуют степени твердости А2 по ГОСТ 13345-85. Для оценки микроструктуры готовой жести отбирались пробы с заднего конца при дрессировке, при этом величина зерна феррита на всех образцах жести составляет 8-10 балл. Структурно-свободный цементит на всех образцах готовой жести 2 балла и расположен он в виде цепочек вдоль направления прокатки (Ряд Б).

Вывод: изменением схемы охлаждения на отводящем роллганге удалось снизить балл структурно-свободного цементита и повысить пластические характеристики жести.

### Литература

1. Васильев Я.Д., Замогильный Р.А., Самокиш Д.Н. К определению рациональной толщины горячекатаного подката для производства тонкой жести методом одинарной прокатки // Черная металлургия. 2016. №12. С. 56-61.

2. Дьяконов А.А., Молева О.Н., Мельников Ю.А. Совершенствование технологии производства тонкой жести однократной прокатки // Сталь. 2012. №3. С. 34-35.

3. Литвиненко Д.А. Холоднокатаная нестареющая сталь. Изд-во «Металлургия», 1968, 168с.

4. Дорогобид В. Г. Ильина Н.Н. Технология производства и механические свойства жести: Учебное пособие. – Магнитогорск: МГТУ, 2002. – 130 с.

5. Губанов С.А., Чикишев Д.Н. Ускоренное контролируемое охлаждение, применяемое на толстолистовых станах для производства высокопрочных сталей // Калибровочное бюро: электрон. науч. журн. Выпуск 3.1. 2014. С. 4-10. URL:<http://www.passdesign.ru/numbers/> (дата обращения: 30.04.2019).

6. Губанов С.А., Чикишев Д.Н. Контролируемая прокатка и ускоренное контролируемое на толстолистовом стане для производства трубных сталей // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2014. №20. С. 207-215.

7. Губанов С.А., Чикишев Д.Н., Пустовойтов Д.О. Конечно-элементное моделирование процесса ускоренного охлаждения толстолистового проката // Современные тенденции в образовании и науке: сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции: в 14 частях. Тамбов, 2014. С. 38–42.

УДК 531.782

## **ОЦЕНКА ПЛАСТИЧНОСТИ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПРОВОЛОКИ ИЗ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ МЕДИ**

*Ерёмин А.В., Логинов Ю.Н.*

*ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»,  
Екатеринбург, Россия  
a.v.yeryomin@gmail.com*

Вследствие высокой электропроводности наравне с алюминием медь применяется для изготовления проводов и кабелей. Из-за постоянных изменений технологии их производства меняются и свойства готового продукта [1,2]. Довольно большое количество проводников тока выпускается в виде медных профилей некруглого поперечного сечения. К ним относятся прямоугольные профили, требования к которым предъявляются со стороны стандарта ГОСТ 434-78 «Проволока прямоугольного сечения и шины медные для электрических целей». Данное исследование направлено на проведение испытаний этого вида продукции.

Образцы отбирали в ходе производства прямоугольных профилей. Эти профили получают волочением на машине со скольжением многократным протягиванием через волочильный инструмент. После получения необходимого размера изделие подвергают рекристаллизационному отжигу для достижения максимальной пластичности [3]. Испытание на разрыв осуществляли на испытательной машине «SHIMADZU AG-50kNX» с применением экстензометра (рисунок) для более точного определения механических свойств. Определяли временное сопротивление, условный предел текучести, относительное удлинение до разрыва. В до-

полнение к требованиям стандарта измеряли относительное сужение в месте разрыва образцов, причем отдельно, для параметров ширины, толщины и площади. Внешний вид места разрыва показан на рисунке. В дальнейшем оценивали показатели относительного сужения в функции отношения ширины к толщине. Выявили, что относительное сужение уменьшается с увеличением указанного отношения.

Эта ситуация повторялась при переходе от изготовления различных типоразмеров.

Отсюда следует такой вывод, что отход от схемы осесимметричной деформации приводит к уменьшению показателя пластичности материала. Такое явление требовало объяснений.

В работах [4, 5] было показано, что кислородсодержащая медь склонна к проявлению анизотропии при ее текстуровании как методами деформации, так и термической обработки.



Рис. 1. Образец с экстензометром в захватах испытательной машины (а) и внешний вид образца в месте разрыва(б)

При переходе от осесимметричной деформации к объемной возникают дополнительные сдвиговые деформации, которые приводят к различной направленности текстуры не только вдоль направления удлинения, но и в двух поперечных направлениях. Эта ситуация наследуется после отжига, что приводит к различиям в направлении развития пластической деформации при образовании шейки на образцах.

#### Литература

1. Логинов Ю.Н., Демаков С.Л., Илларионов А.Г., Иванова М.А., Романов В.А. Структурное состояние медной катанки, полученной при непрерывном процессе литья-прокатки // Цветные металлы. - 2013. - № 8 (848). - С. 87-92.

2. Логинов Ю.Н., Демаков С.Л., Илларионов А.Г., Попов А.А. Влияние скорости деформации на свойства электротехнической меди // Металлы. - 2011. - № 2. - С. 31-39.

3. Логинов Ю.Н., Демаков С.Л., Илларионов А.Г., Степанов С.И., Копылова Т.П. Сопоставительный анализ свойств медной проволоки после протяжного и конвейерного отжига // Цветные металлы. - 2014. - № 10 (862). - С. 88-92.

4. Логинов Ю.Н., Демаков С.Л., Илларионов А.Г., Карабаналов М.С. Расчет деформаций и экспериментальное исследование текстуры в нагартованной медной проволоке // Деформация и разрушение материалов. 2011. № 5. С. 38-44.

5. Pal-Val P.P., Natsik V.D., Pal-Val L.N., Loginov Y., Demakov S.L., Illarionov A.G., Davydenko A.A., Rybalko A.P. Unusual Young's modulus behavior in ultrafine-grained and microcrystalline copper wires caused by texture changes during processing and annealing // Materials

УДК 621.774.39

## **ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРА УПРОЧНЕНИЯ НА ТЕЧЕНИЕ МЕТАЛЛА ПРИ ВЫСАДКЕ КОНЦОВ ТРУБ**

*Ерпалов М.В., Сидякина Е.В.*

*ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»,*

*Екатеринбург, Россия*

*filipenko-liza@rambler.ru*

Высадка концов труб представляет собой локальное утолщение стенки трубы на заданном расстоянии от торца, предназначенное для последующей нарезки резьбы и навинчивания соединительной муфты. Операция высадки осуществляется путем набора металла в закрытую полость матриц при осевом перемещении пуансона. Для осуществления высадки на заданном расстоянии от торца трубу нагревают на ограниченной длине до температуры 1260-1280°C. Это позволяет не только снизить сопротивление металла пластической деформации, но локализовать ее в ограниченной области трубы. При этом холодную часть трубы можно рассматривать как инструмент, участвующий в создании осевого подпора для деформируемой зоны заготовки.

Вопросы качества труб с высаженными концами имеют важное значение как для промышленности, так и для науки [1]. Однако в большинстве работ изучается влияние лишь технологических параметров на течение металла в очаге деформации, в то время как в работах [2, 3] установлено принципиальное влияние характера кривой упрочнения материала на однородность распределения степени деформации в процессах обработки металлов давлением, в частности при открытой осадке цилиндров плоскими бойками, при продольной прокатке и волочении труб. Задачей настоящей работы является изучение на качественном уровне

влияния характера кривой упрочнения на течение металла в очаге деформации при высадке концов труб.

Для установления влияния характера кривой упрочнения на течение металла и качество высаженных концов труб был использован подход, предложенный в работе [2]. Были поставлены и решены задачи компьютерного моделирования процесса высадки на тестовых материалах в программе Deform-3D. Условно материалы были названы «упрочняющийся», «идеально пластичный» и «с эффектом разупрочнения». При температуре металла 1250°C, соответствующей температуре нагрева конца трубы, значения сопротивления деформации изменяются от  $\sigma_{s0} = 50$  МПа до 75 МПа, 50 МПа и 25 МПа соответственно. Для всех трех материалов значения сопротивления деформации составляют 800 МПа при комнатной температуре и 300 МПа – при температуре 900°C. Величина степени деформации  $\epsilon = 0,3$ , до которой происходит изменение свойств материалов, выбрана в соответствии с коэффициентом осадки по стенке при высадке концов труб размером 73,02x5,51 мм. По достижении заданной степени деформации напряжения течения не изменяются.

По результатам решения тестовых задач методом конечных элементов установлены распределения значений степени деформации материала по объему очага деформации в начальной, промежуточной (рис. 1) и конечной стадиях процесса высадки. Известно, что для обеспечения качества внутренней поверхности высаженных концов труб, металл должен заполнять пространство, образованное матрицами и пуансоном в направлении хода пуансона. Это означает, что в промежуточной стадии высадки распределение деформаций должно быть смещено в сторону наибольших значений, которые соответствуют уже заполнившей штамповое пространство части конца трубы.

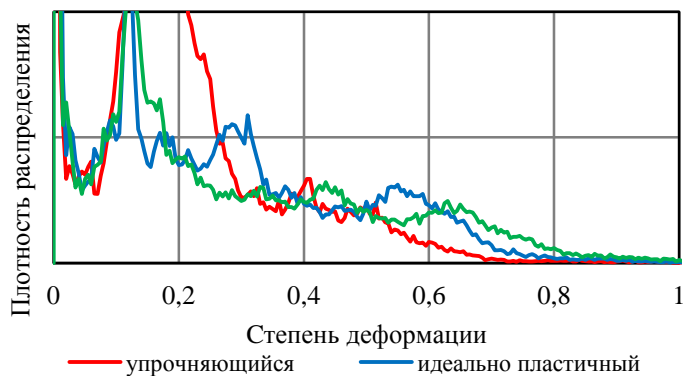


Рис. 1. Гистограммы распределения деформации по объему конца трубы в промежуточной стадии высадки (ход пуансона 220 мм)

Как видно из рис. 1 наилучшее заполнение штампового пространства наблюдается для материала, обладающего эффектом разупрочнения, наихудшее – для упрочняющегося материала. Таким образом, при назначении технологических режимов высадки концов труб необходимо стремиться выбирать скорость и температуру деформации, при которых кривая упрочнения материала имеет наименьшую крутизну.

#### Литература

1. Ерпалов М.В. Причины образования и пути устранения дефектов на внутренней поверхности высаженных концов труб // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2016. – №1. – С. 36-39.
2. Логинов Ю.Н. Влияние вида кривой упрочнения на локализацию деформации при осадке титановых заготовок // Титан. – 2012. – №1. – С. 22-28.
3. Павлов Д.А. Исследование влияния свойств материала на неоднородность деформации при продольной прокатке труб на короткой оправке // Черные металлы. – 2018. – №10. – С. 17–21.

УДК 669.721

### ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ОБОЛОЧКИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ОСАДКИ МАГНИЯ В ХОЛОДНОМ СОСТОЯНИИ

*Замараева Ю.В., Логинов Ю.Н.  
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»,  
Екатеринбург, Россия  
zamaraevajulia@yandex.ru*

Магний как материал, имеющий гексагональную плотноупакованную (ГПУ) кристаллическую решетку, обладает ограниченным количеством плоскостей скольжения, что приводит к пониженной пластичности [1]. В связи с этим его пластическая обработка чаще всего осуществляется в горячем состоянии, что позволяет повысить пластические свойства [2], однако при этом теряется эффект нагартовки металла, позволяющий увеличить прочностные свойства конечного продукта. Переход к обработке магния в холодном состоянии позволяет ликвидировать этот недостаток.

Повышение уровня пластичности может быть достигнуто повышением уровня сжимающих напряжений. В области кузнечной осадки это чаще всего достигается созданием удельных сил подпора со стороны оболочки [3]. Экспериментально положительный эффект подпора приме-



нительно к обработке магния показан в статье [4]. Целью работы является определение условий работоспособности оболочки при осадке магневых заготовок.

Моделирование осуществили методом конечных элементов в программном модуле DEFORM-2D.

Использовали модель изотропной среды с упрочнением, которое описано в статье [5].

Постановка задачи включала в себя описание геометрии очага деформации в исходном состоянии, описание физических и пластических свойств на основе справочных данных, задание граничных условий в перемещениях.

Установлены взаимодействия трех типов на контактах: заготовка – бойки, обойма – бойки, заготовка – обойма. На контакте с инструментом задан закон трения по Кулону с коэффициентом трения 0,1, поскольку осадку осуществляли со смазкой. На границе между заготовкой и обоймой смазка отсутствует, и поскольку оба материала – медь и магний – обладают повышенными адгезионными свойствами, то коэффициент трения на этой поверхности приняли равным 0,5.

На рис.1 представлено решение краевой задачи при относительном обжатии 50% с сеткой конечных элементов.

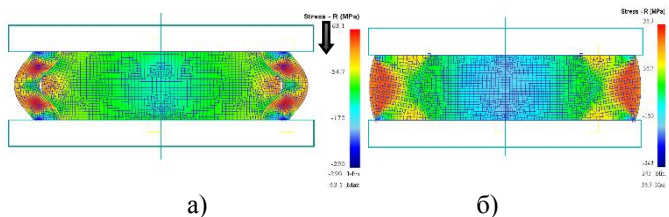


Рис. 1. Распределение напряжений при совместной осадке магниевого образца в медной обойме; справа цветовой ключ; темная стрелка указывает на образование полости между заготовкой и обоймой: а) толщина стенки обоймы 5 мм; б) толщина стенки обоймы 10 мм

Из рис. 1, а видно, что формоизменение такой сборки сопровождается образованием полости между образцом и обоймой (обозначено темной стрелкой). Также видно, что обойма на части контактной поверхности не выполняет своей функции – она не создает сжимающих напряжений. Мало того, в самой заготовке в области образования полости создаются напряжения растяжения, которые появляются вследствие образования бочки. Это не позволяет обеспечить высокий уровень пластичности по всему объему заготовки.

На рис. 1, б показано, что при формоизменении сборки с увеличенной толщиной стенки обоймы полость между образцом и обоймой не

образуется. Обойма на контактной поверхности выполняет свою функцию – создает сжимающие напряжения. В заготовке на контактной поверхности также создаются напряжения сжатия. Это позволяет обеспечить высокий уровень пластичности по всему объему заготовки.

Таким образом, установлено влияние толщины стенки обоймы на образование зазора между обоймой и заготовкой – с увеличением толщины стенки обоймы уровень пластичности в данной схеме осадки увеличивается.

### Литература

1. Кругликов Н.А. Микроструктура и механические свойства литого магния / Н.А. Кругликов [и др.] // Литейщик России. 2013. № 8. С. 17-21.
2. Логинов Ю.Н. Изучение упрочнения и разупрочнения магния с учетом анизотропии свойств / Ю.Н. Логинов, С.П. Буркин, В.В. Сапунжи // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 1999. № 6. С. 42-46.
3. Каменецкий Б.И. Методы и устройства для повышения пластичности хрупких материалов при холодной осадке с боковым подпором / Б.И. Каменецкий, Ю.Н. Логинов, А.Ю. Волков // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. № 9. С. 15-22.
4. Каменецкий Б.И. Влияние условий бокового подпора на пластичность магния при холодной осадке / Б.И. Каменецкий, Ю.Н. Логинов, Н.А. Кругликов // Технология легких сплавов. 2012. № 1. С. 86-92.
5. Комкова Д.А. Структура и текстура магния после низкотемпературной мегапластической деформации / Д.А. Комкова, А.Ю. Волков // Вектор науки ТГУ. 2017. № 3(41). С. 70-75.

УДК 669

### АНАЛИЗ РАЗНОТОЛЩИННОСТИ ПРИ ШТАМПОВКЕ ОТВОДОВ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 08Х18Н10Т

*Ивлева Т.С.<sup>1</sup>, Мыльников С.В.<sup>2</sup>, Грехов С.К.<sup>2</sup>, Салихьянов Д.Р.<sup>2</sup>*  
*<sup>1</sup>ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ»,  
Белгород, Россия*

*<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
Екатеринбург, Россия  
salenhall@gmail.com*

Одним из важных элементов трубопроводов атомных станций являются крутоизогнутые отводы из коррозионно-стойких сталей с соотношением радиуса гиба и диаметра отвода  $R=(1\div 1,5)\times D_n$ , предназначен-

ные для изменения направления потока рабочей среды. Среди известных способов получения отводов – штамповка из трубных заготовок, штамповка из листовых заготовок с последующей сваркой, гибка в специальных штампах, протяжка по рогеобразному сердечнику – широкое применение получил способ штамповки из трубных заготовок благодаря высокой производительности [1]. В сравнении с гибкой, штамповка из трубных заготовок обеспечивает более высокую точность размеров по радиусугиба и диаметру, а также возможность изготовления отводов с относительно малым радиусомгиба.

Штамповка отводов из стали 08Х18Н10Т размеров  $\text{Ø}57 \div \text{Ø}219$  мм осуществляется за две операции. В качестве заготовки используется труба со скосами (рис. 1). Температура нагрева составляет  $1050 \div 1100$  °С. В первой операции производится плющение заготовки на заданную величину. Затем, во второй операции, выполняется гибка расплющенной заготовки в штампе.

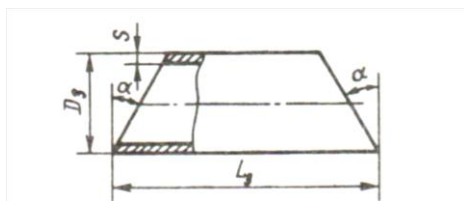


Рис. 1. Эскиз заготовки для штамповки отвода

В качестве проблем, присущих штамповке из трубных заготовок, можно выделить образование локальных утолщений на наружной и внутренней поверхностях в области линии разъема штампа, а также разнотолщинность по всему сечению отвода. Из опытных данных производства известно, что большие значения разнотолщинности наблюдаются в средней части отвода. Проблему разнотолщинности следует считать значимой, т.к. она уменьшает эксплуатационные и прочностные характеристики отвода, а в отдельных случаях она может приводить к неисправному браку изделия. Толщина стенки должна обеспечивать работоспособность и безопасную эксплуатацию отвода на весь срок службы трубопровода.

С целью решения проблемы уменьшения разнотолщинности отводов, была поставлена серия вычислительных экспериментов процесса штамповки из трубных заготовок в пакете Q-Form (рис. 2).



Рис. 2. Общий вид штампованного отвода и распределение температуры

Результаты компьютерного моделирования показали тот же характер распределения разнотолщинности по сечению отвода что и на практике – расположение зон локальных утолщений и утонений совпадают (рис. 3).

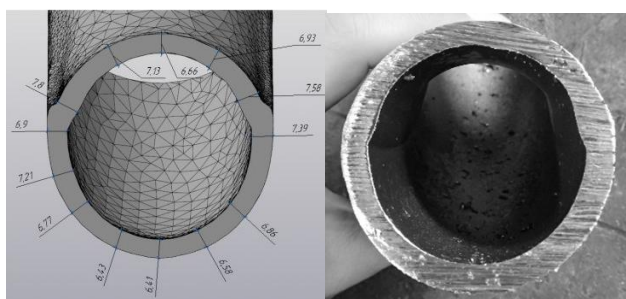


Рис. 3. Разнотолщинность штампованных отводов

Относительная разница при сопоставлении толщины стенки при компьютерном моделировании с фактическими данными не превышает 10 %. При постановке и решении вычислительных задач исследовалось влияние размеров заготовки, конфигурации инструмента, температурного режима штамповки, подогрева штампов. В результате оптимизации температурного режима, размеров заготовки и конфигурации инструмента удалось уменьшить разнотолщинность отводов с 34% до 10 %.

*Исследование выполнено в рамках базовой части государственного задания № 11.9538.2017/8.9. Работа выполнена при финансовой поддержке постановления №2 11 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.A03.21.0006.*

### Литература

1. Семенов Е.И. Ковка и штамповка: справочник в 4-х т. Т. 2. Горячая штамповка / Под ред. Е.И. Семенова. – 1986. – 592 с.

## **ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИЧИН ПОЯВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ В МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ, ИЗГОТАВЛИВАЕМОЙ МЕТОДОМ НЕПРЕРЫВНОГО ПРЕССОВАНИЯ CONFORM**

*Ковин Д.С., Шимов Г.В., Савиных В.В.  
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»,  
Екатеринбург, Россия  
wertlos@mail.ru*

На сегодняшний день в производство алюминиевых и медных профилей активно используется технология непрерывного прессования CONFORM. Данная технология позволяет получать сложные профили неограниченной длины, при условии совмещения ее с технологией непрерывного литья заготовки.

Впервые технология была представлена в 1971 году в патенте Д. Грина [1]. Ее основная особенность была в создании усилия прессования за счет сцепления поверхностей материала и инструмента, используя силы трения. Первоначально технология была рассчитана на производство изделий из порошковых материалов.

Конструктивно современный инструмент непрерывного прессования CONFORM представляет из себя колесо с желобом внутрь которого запрессовывается заготовка при помощи установочного ролика и таким образом протягивается до упора, который «вырезает» заготовку из желоба. Затем заготовка поступает в форкамеру для распрессовки и дальнейшего прессования через матрицу. Не смотря на высокую производительность конструкция оборудования, да и сама технология непрерывного прессования CONFORM требует совершенствования, поскольку очень часто не удается получить требуемое качество изделий. При производстве медных изделий, в частности, медных шин, по сечению прессованного изделия часто возникают дефекты типа «расслоение», они представляют из себя тонкие включения и поры с окислами меди внутри. При проведении отжига медных шин с целью улучшения их эксплуатационных характеристик дефекты типа «расслоение» проявляются на поверхности в виде «пузырей» [2], что приводит к качественному ухудшению продукции. Причиной таких дефектов могут быть различные факторы: наличие пузырей и включений в медной катанке, не правильный режим непрерывной разливки, перегрев металла при прессовании, затягивание оксидов в форкамеру и др.

Впервые решением задач по устранению дефектов при производстве изделий по технологии непрерывного прессования CONFORM занялись команды китайских ученых. В своих работах [3-7] авторы опи-

сали дефект отслоения металла от поверхности колеса, выделили основные характеристики процесса и исследовали как они влияют на образование дефекта отслоения. Процесс образования данного дефекта сильно напоминает процесс образования пресс-утяжины, как при классическом прессовании. К числу характеристик, влияющих на образование дефекта отслоения, отнесли следующие: отношение высоты входа в форкамеру к ширине канавки в колесе; отношение ширины зазора для стружки к ширине канавки в колесе; отношение глубины упора к ширине канавки в колесе; скорость вращения колеса; коэффициент трения между колесом и заготовкой. В представленных выше работах авторы выяснили, что отношение ширины зазора для стружки к ширине канавки в колесе и коэффициент трения между колесом и заготовкой являются наиболее значимыми характеристиками при образовании дефекта отслоения.

В работах [8, 2] авторы описали промышленный эксперимент по исследованию траекторий течения металла в форкамере при прессовании шины и изучили процесс отслоения и затягивания окисленного слоя с контакта «колесо-металл» в пресс-изделие. Промышленный эксперимент показал, что в реальных условиях непрерывного прессования металл с контакта «заготовка-колесо» может затягиваться в форкамеру, что не удается увидеть в ходе конечно-элементного моделирования.

Успешное в той или иной степени решение проблем поверхностных дефектов медных шин можно наблюдать на машинах с системой охлаждения экструзионного колеса. В случае отсутствия системы охлаждения колеса причиной расслоений и пузырей часто является перегрев металла в зонах интенсивной деформации в форкамере.

### Литература

1. Extrusion: patent US3765216A US / Green D.; Current Assignee: UK Atomic Energy Authority. — Access mode: <https://www.google.com.na/patents/US3765216>.
2. Фоминых Р.В., Шимов Г.В., Ковин Д.С. Течение металла в очаге деформации при непрерывной экструзии медных шин способом CONFORM // Материалы III молодежной научно-практической конференции «Magnitogorsk Rolling Practice 2018». Под редакцией А.Г. Корчунова. 2018. С. 89-91.
3. Peng D. Recent development in the conform process in UK // Fabrication Technology. Light Metals. — 1990. — no. 1. — P. 33–39.
4. Peng D. S., Yao B. Q., Zuo T. Y. The experimental simulation of deformation behavior of metals in the conform process // Journal of Materials Processing Tech. — 1992. — Vol. 31, no. 1-2. — P. 85–92.
5. Simulation of the conform process: Numerical and experimental methods / Y. Peng, T. Zuo, D. Peng, X. Ruan // Proceedings of the Fourth International Conference on Tech.of Plasticity. — 1993. — P. 570–575.

6. Cho J. R., Jeong H. S. Parametric investigation on the surface defect occurrence in conform process by the finite element method // Journal of Materials Processing Technology. — 2000. — Vol. 104. — P. 236–243.

7. Cho J. R., Jeong H. S. Parametric investigation on the curling phenomenon in conform process by the three-dimensional finite element method // Journal of Materials Processing Technology. — 2001. — Vol. 110, no. 1. — P. 53–60.

8. Шимов Г.В., Фоминых Р.В., Ефремова Е.С., Ковин Д.С. Исследование траектории течения непрерывнолитой меди при прессовании способом CONFORM. Цветные металлы. № 4. 2018. С. 79-85.

УДК 621.85.054

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ОПЕРАЦИИ КРУГОВОГО КАЛИБРУЮЩЕГО ОБЖАТИЯ**

*Кривцов А.И., Столяров Ф.А., Харитонов В.А.  
Магнитогорский государственный технический  
университет им.Г.И. Носова,  
Магнитогорск, Россия  
krivtsovsanek@mail.ru*

По причине малой изученности, возможность применения калибрующего обжатия на сегодняшний день имеет узкий круг применения. Ввиду этого, появляется необходимость в проведении исследований закономерностей развития деформации и разработка на основе полученных данных эффективных режимов калибрующих обжатий

Применение данной операции к стальным арматурным канатам позволяет:

- нейтрализовать раскручивание каната;
- повысить усталостный силовой диапазон каната до  $2 \cdot 10^6$  циклов и более;
- повысить коэффициент сцепления арматурного каната в 2 раза;
- снизить затраты на операцию стабилизации каната;
- увеличить площадь контактного давления путем обеспечения между проволоками полосового контакта;
- придать высокую точность геометрических параметров;
- снизить потери от релаксации напряжений;
- продлить срок эксплуатации каната в 1,5 раза;
- увеличить износостойкость в 2,0-2,5 раза по сравнению с недеформированными канатами той же конструкции за счет уменьшения контактных напряжений между элементами каната;

- увеличить сопротивляемость поперечным деформациям (раздавливанию);
- улучшить антикоррозионные свойства.

Проведенные исследования показали, что калибрующее обжатие при достаточной простоте метода обладает эффективным и конкурентоспособным методом обработки, способным улучшить напряженное состояние пряди и самого каната, сформировать удовлетворительные контактные условия и повысить точность изготовления прядей и каната.

УДК 621.778

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН УШИРЕНИЯ ЗАГОТОВКИ ГАЙКИ M16 УВЕЛИЧЕННОЙ ВЫСОТЫ ПРИ ПРОШИВКЕ ЦЕНТРАЛЬНОГО ОТВЕРСТИЯ**

*Куркин А.А.<sup>1</sup>, Столяров Ф.А.<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup> ОАО «ММК-МЕТИЗ», Магнитогорск, Россия*

*<sup>2</sup> Магнитогорский государственный технический  
университет им. Г.И. Носова,  
Магнитогорск, Россия  
alex\_kyrkin74@mail.ru*

Каталог метизной продукции с каждым годом расширяется. Потребителям все чаще требуется крепеж с нестандартными геометрическими и физико-механическими параметрами. Совершенствование технологии производства высоких гаек позволит ОАО «ММК-МЕТИЗ» вывести на рынок новый вид продукции.

Гайка находит свое применение в самых различных сферах, от изготовления мебели до мостостроения. Наиболее популярных являются шестигранные гайки используемые в машиностроительной отрасли. Одни из самых востребованных машиностроительных гаек являются гайки по ГОСТ 5915-70 и ГОСТ 5927-70. Изготовление данных видов крепежа хорошо освоены на ОАО «ММК-МЕТИЗ» различных типоразмеров и видов.

Не так давно поступил запрос от потребителя на заготовку гайки M16 с высотой 19мм без резьбы по чертежу. По результатам проведенной опытной работы, выявили несоответствие геометрических параметров изделия. При первоначальной разработке технологии на заготовку гайки по чертежу, придерживались существующей технологии на гайку по ГОСТ 5915-70. Из-за нестандартного размера  $m$  - высота гайки по сравнению с ГОСТ 5915-70, при прошивке отверстия под резьбу, заготовку «раздувало», в следствии чего размеры  $e$  - диаметр описанной окружности и  $S$  - размер под ключ, выходили за пределы допусков, в



следствии чего изделие не смогло пройти проверку специальным шаблоном на перпендикулярность граней к опорной поверхности.

Для решения данной проблемы было принято решение использовать метод конечных элементов. При проведении расчетов в программе QFORM 3D была выявлена коренная причина несоответствия геометрических параметров заготовки гайки. При опытной штамповки использовался инструмент похожий как при производстве гайки по ГОСТ, в следствии чего выдра формирующаяся по операциям оказалась критично больших размеров. При прошивке центрального отверстия под резьбу прикладывалось очень большое усилие для отрыва выдры от стенок гайки, а так же происходило сплющивание выдры, что влияло на уширение самой заготовки у опорной поверхности. Так же при прошивке использовался пробивной пуансон плоской формы, при этом формирующие выдру пуансоны имеют коническую форму.

Для определения оптимального размера выдры перед прошивкой центрального отверстия в заготовке гайки был проведен ряд расчетов компьютерного моделирования. Каждое уменьшение размера выдры положительно сказывалось на исходном размере готового изделия. В итоге, по результатам расчета была определена оптимальная высота выдры – 5,4 мм. При такой выдре заготовка гайки после прошивки центрального отверстия получается правильной формы, грани гайки перпендикулярны опорной поверхности. Так-же за счет изменения размера выдры снизилось усилие прикладываемое к инструменту, в сравнении с первоначальным моделированием почти на 50 Кн, что положительно скажется на стойкости инструмента.

На ряду с исследовательской работой по уменьшению размера выдры был произведен расчет пробивки центрального отверстия с использованием пуансона конической формы, с углом конуса 150 градусов . По результатам полученных данных средние напряжения в одно и тоже время в одном и том же месте заготовки гайки оказались разными. При использовании пробивного пуансона конической формы напряжения возникающие в изделии меньше по сравнению со стандартными почти на 30%, следовательно меньше вероятность появления на поверхности изделия трещин и надрывов.

При выполнении работы проведено компьютерное моделирование, результаты которого показали необходимость изменения инструмента для производства заготовки гайки, а именно замена пробивного пуансона плоской формы на пуансон конической с углом конуса 150 градусов и уменьшения размера выдры с 10,4 мм до 5,4 мм. Принятые изменения позволили снизить энергосиловые затраты на формирование сквозного отверстия под резьбу. Получены гайки с гранями, перпендикулярными ее основанию, и требуемыми геометрическими параметрами.

## Литература

1. Нормативная документация – технологическая инструкция и карта на изготовление гаек (заготовок гаек) ОАО «ММК-МЕТИЗ».

УДК 62-523.2

### **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА МАШИНЫ ГАЗОВОЙ РЕЗКИ В УСЛОВИЯХ ПРОКАТНОГО ЦЕХА АО "УРАЛЬСКАЯ СТАЛЬ"**

*Лицин К.В., Макаров Я.В.  
Новотроицкий филиал "МИСиС",  
Новотроицк, Россия  
makarov.y@gmail.com*

Достаточно распространенной проблемой на предприятиях, на сегодняшний день является неудовлетворительная работа машин термической резки и других автоматизированных установок.

Выделяя недостатки действующих схем, можно отметить следующее:

– Многие модели тиристорных преобразователей сняты с производства, как морально устаревшие. Из-за отсутствия запасных частей возможен полный выход преобразователей из строя.

– Релейно-контакторные схемы управления характеризуются большой величиной инерционности системы, приводящей к неплавному пуску и торможению привода.

– Отсутствие возможности плавного регулирования скорости продольного и поперечного хода.

Сочетание этих факторов обуславливает необходимость модернизации электроприводов таких машин с целью повышения эффективности технологических процессов.

К требованиям, обеспечивающим надёжную и экономичную работу электропривода в течение срока эксплуатации оборудования, можно отнести:

- высокая надёжность и безотказность работы электропривода;
- широкий диапазон регулирования скорости;
- высокое быстродействие, то есть минимальное время протекания переходных процессов;
- точная отработка заданных перемещений;
- работа в строго определённом цикле;
- рекуперация энергии в сеть при режимах торможения;
- аварийное торможение.

Синхронные двигатели с постоянными магнитами — это наиболее перспективные электрические машины в диапазоне малых и средних мощностей (особенно для моментных систем электропривода). Двигатели такого типа конструктивно просты и надёжны. Они имеют абсолютно жёсткие механические характеристики и не требуют затрат на возбуждение, обладают большой перегрузочной способностью и высоким быстродействием в переходных процессах.

На рисунке 1 представлена разработанная модель привода, основанного на синхронном двигателе с постоянными магнитами, в среде MATLAB.

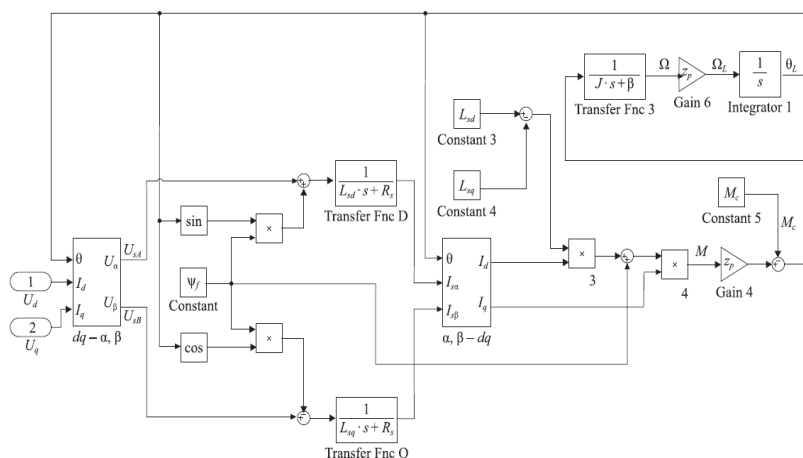


Рис. 1. Модель синхронного двигателя с постоянными магнитами

Особенностью разработанной системы электропривода является возможность моделирования реакции системы при подаче на вал различных нагрузок, что необходимо при анализе работы системы управления синхронным двигателем в случае возмущений. Отмечено, что данная модель двигателя позволяет проводить настройку и анализ влияния сухого и вязкого трения на характер вращения.

### Литература

1. Косматов В.И. Проектирование электроприводов металлургического производства. Учебное пособие. Магнитогорск: МГТУ, 2000. 244 с.
2. Фотиев М.М. Электропривод и электрооборудование металлургических цехов. - М.: Металлургия, 1990
3. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» - Иваново 2008 – 298 с

4. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; Спб.: Питер, 2008. – 288 с.: ил.

УДК 620.182.2

## **МЕТОДИКА ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ПОЛИРОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ EBSD-АНАЛИЗА**

*Ефимова Ю.Ю., Лопатина Е.В., Барышникова А.М.*

*Магнитогорский государственный технический*

*университет им.Г.И. Носова,*

*Магнитогорск, Россия*

*lopatina.yekaterina2016@yandex.ru*

В настоящее время при проведении металлографических исследований для анализа структуры материалов, широкое распространение получил метод растровой электронной микроскопии. Одной из возможностей, реализуемых, в электронных микроскопах является, система регистрации обратно-рассеянных электронов – EBSD - анализ (Electron backscatter diffraction). EBSD-анализ решает следующие задачи:

- Исследования текстуры
- Исследования дефектов
- Определения и разделения фаз
- Изучение границ зёрен
- Картирования микродеформаций

Для качественного проведения EBSD - анализа предъявляют специальные требования к поверхности исследуемого материала: строгое соблюдение угла наклона с горизонталью; достаточно высокий контраст кикучи-картины для успешного индицирования; поверхность не должна быть подвержена пластической деформации [1]. Последнее требование трудно, а иногда и невозможно осуществить традиционными методами подготовки шлифов с применением абразивных материалов (паст, суспензий и т.д.). Одним из методов исключаящих деформацию поверхностного слоя является электролитическое полирование. Сущность электролитического полирования заключается в уменьшении пиков микронеровностей путём эрозии в электролите под действием постоянного электрического тока [2]. Основными параметрами электролитического процесса полирования являются: напряжение; сила тока; время процесса полирования; температура электролита; химический состав и концентрация электролита; состояние поверхности и химический состав обрабатываемого материала. Важным является разработка режимов электролитического полирования для различных материалов [3]. В работе проведено

исследование влияния указанных параметров для установки электролитического полирования Lecrtopol-5 производства компании Struers на качество поверхности для сталей различного химического состава, меди марки М - 1, алюминиевого сплава АВ - 87

### Литература

1. Вашуль Х. Практическая металлография. Издательство «Металлургия», 1988.-317с.
2. Барышев Е.Е. Изучение структуры сплавов системы железо-углерод // Учебное электронное текстовое издание, 2008. – 17 с.
3. Лопатина Е.В., Зникин И.Е., Носов Л.В. Особенности подготовки образцов для EBSD-анализа // Обработка сплошных и слоистых материалов. – 2018. – Т. 1. – № 1. – С. 40–44.

УДК 669.1.002.5-192

- методики теоретического поиска эффективных сочетаний исходных профилировок рабочих валков и усилий их противоизгиба для обеспечения максимально возможного ресурса валков;

- результаты сравнения долговечности валков, изготовленных из современных марок, стали: AST-70X фирмы GontermannPipers (Германия), 18CR3NS фирмы Akers (Франция), MC3-ST2 фирмы JSW (Япония), 75ХМФ фирмы УЗТМ (Россия);

- коэффициенты повышения долговечности валков при использовании смазочно-охлаждаемых жидкостей и ударно-фрикционного плакирования поверхностей, позволяющими повысить ресурс валков в 1,17-2,0 раз.

Практическая значимость работы определяется возможностью практического использования следующих разработок:

- методики и программы расчета проектного ресурса опорных валков ШС по критериям прочности и износостойкости материалов;

- результатов теоретических исследований, позволяющих выбирать наиболее эффективные конструктивные и технологические способы продления ресурса опорных валков;

- рекомендаций по практическому внедрению выбранных способов для повышения долговечности опорных валков.

### Литература

1. Методология вероятностной оценки элементов машин по различным критериям / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), В.П. Анцупов, М.Г. Слободянский, А.М. Овсов // Механическое оборудование металлургических заводов: Межрегион. сб. науч. тр. / - Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та, 2012. С. 28-34.

2. Федоров В.В. Кинетика повреждаемости и разрушения твердых

тел. Ташкент: Издательство «Фан» УзССР, 1985. 165с.3. Фамилия И.О. Название статьи // Журнал. – 2012. – Т. 1. – № 11. – С. 71–77.

4. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 560с.

5. Салганик В.М., Мельцер В.В. Исследование на ЭВМ деформаций и нагрузок валковой системы кварто: учебное пособие – Свердловск: УПИ 1987. – 78 с.

УДК 669

## **КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРАВКИ РЕЛЬСОВОЙ НАКЛАДКИ В СОРТОПРАВИЛЬНОЙ МАШИНЕ**

*Мыльников С.В.<sup>1,2</sup>, Исхаков Р.Ф.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> *ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия*

<sup>2</sup> *ЗАО НПП «Машипром», Екатеринбург, Россия  
segav247@gmail.com*

В современном мире программные комплексы компьютерного моделирования повсеместно используются для исследования и визуализации различных процессов, в том числе обработки металлов давлением. При помощи моделирования методом конечных элементов (МКЭ) возможно исследовать данные о напряженно-деформированном состоянии (НДС), температурные поля, энергосиловые параметры и т.д.

Для анализа процесса правки в сортоправильной машине использовали программный пакет «DEFORM 3D». Согласно данным о профиле рельсовой накладке, можно сделать вывод о том, что профиль имеет не осесимметричное строение, поэтому моделирование проводилось без упрощения модели.

Были поставлены задачи: смоделировать процесс правки с определенным перегибом роликов для качественной правки заготовки, сравнить данные о НДС и энергосиловые параметры с теоретическими расчетами и опытными данными.

В данной задаче моделировали условия холодной правки при постоянной скорости  $v=1,0$  м/с, трение между роликами и заготовкой приняли  $\mu=0,2$  (сухие ролики). Твёрдотельные модели роликов и заготовки были созданы в программе «Компас 3D». Ролики – идеально жесткие, заготовка – упругопластическая. В качестве материала заготовки была выбрана сталь 50. Сетка состоит из тетрагональных конечных элементов,

общее количество элементов – 229616 эл.

Общий вид постановки задачи и конечно-элементная сетка в сечении профиля представлены на рис. 1.

В качестве исследуемых характеристик было изучено напряженно-деформированное состояние (рис. 2), а также были получены данные об усилении правки (рис. 3).

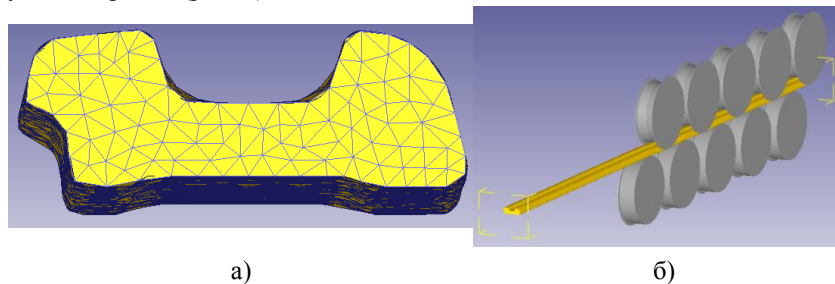


Рис. 1. а) Конечно-элементная сетка профиля рельсовой накладки.  
б) Общий вид постановки задачи в программном комплексе «DEFORM 3D»

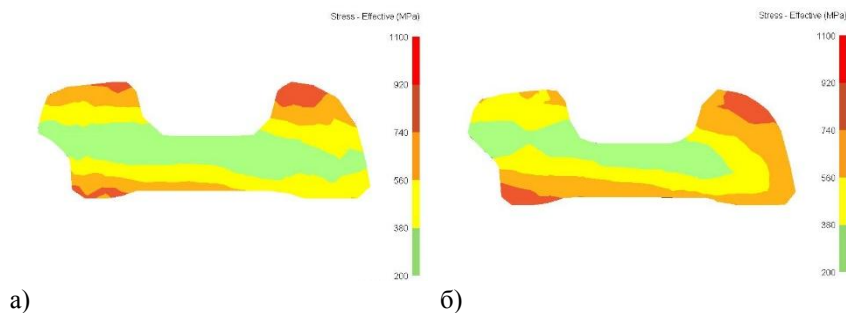


Рис. 2. Интенсивность напряжений в рельсовой накладке при правке:  
а) под 3 роликом; б) под 4 роликом

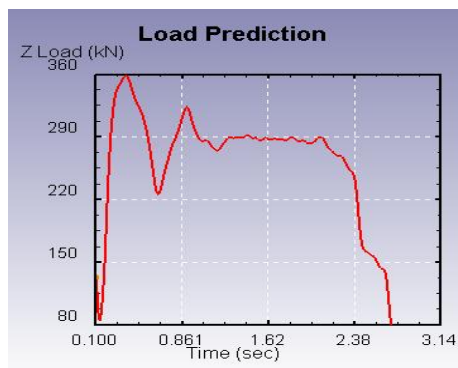


Рис. 3. График усилия правки

С целью проверки качества правки и необходимой мощности была успешно проведена экспериментальная правка рельсовой накладки из стали М54. Максимальный средний момент на приводах составляет 2,41 кНм.

Согласно теоретическим расчетам и данным моделирования максимальное среднее усилие правки приходится на 4 ролик и составляет 289 кН, максимальный средний момент действует на 5 ролике и равен 2,3 кНм.

Сравнение теоретических и опытных данных показывает, что различие между теоретическими расчетами, моделированием и опытными данными составляет не более 5%.

#### Литература

1. Недорезов И.В. Моделирование процессов правки проката на роликовых машинах. – Екатеринбург: «АКВА-ПРЕСС», 2003. – 256 с.
2. Слоним А.З., Сонин А.Л. Правка листового и сортового металла (технология и оборудование). – М.: «Металлургия», 1981. – 232 с.



## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАССОГЛАСОВАНИЯ СКОРОСТЕЙ НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОКАТКИ НА ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ МЕТАЛЛА

**Водопьянова О.В.\***, **Непрыхин С.О.**

*ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»,*

*Екатеринбург, Россия*

*\*ol.vodopianova@gmail.com*

Как известно, натяжение и подпор при сортовой прокатке главным образом влияют на уширение полосы, поэтому было произведено исследование влияния режима прокатки на уширение. В программном пакете Deform-3D были смоделированы следующие режимы прокатки полосы по схеме овал-круг-овал: согласованный, с натяжением (снижение скорости в первой клетке на 5%, 10% и повышение скорости в третьей клетке на 5%, 10%), с подпором (повышение скорости в первой клетке на 5%, 10% и снижение скорости в третьей клетке на 5%, 10%), передний подпор и заднее натяжение, заднее натяжение и передний подпор.

Для оценки влияния рассогласования скоростей прокатки на уширение, были произведены измерения ширины полосы на выходе из второй клетки, при создании натяжения (подпора) первой клетью, и создании дополнительного натяжения (подпора) третьей клетью (рис. 1).

По полученным данным произведён статистический анализ, в результате расчетов было получено уравнение множественной регрессии:

$$Y = 42,4647 - 0,1841X_1 - 0,09996X_2. \quad (1)$$

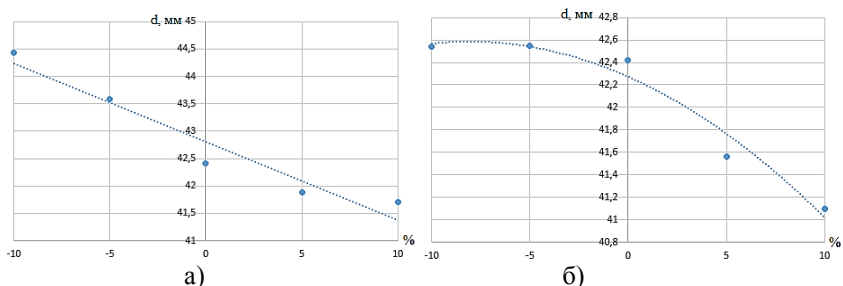


Рис. 1. Влияние скоростного режима на ширину полосы –  
заднее натяжение и подпор (а), переднее натяжение и подпор (б)

Из параметров данной модели следует, что при увеличении рассогласования скоростей между первой и второй клетями ( $X_1$ ) на 1 единицу измерений приводит к уменьшению ширины ( $Y$ ) в среднем на величину

0,184; увеличение рассогласования скоростей между второй и третьей клетями ( $X_2$ ) на 1 единицу измерения приводит к уменьшению ширины ( $Y$ ) в среднем на значение 0,1. По максимальному коэффициенту эластичности  $E_1=0$  делаем вывод, что наибольшее влияние на изменение ширины оказывает рассогласование скоростей между первой и второй клетями, что согласуется с общими теоретическими и практическими представлениями о наибольшем влиянии заднего натяжения (подпора) на формоизменение металла при прокатке, поскольку происходит непосредственное воздействие на зону отставания, в которой происходит основная доля прироста ширины.

Статистическая значимость уравнения (1) проверена с помощью коэффициента детерминации и критерия Фишера. Установлено, что в исследуемой ситуации 90,76% общей вариабельности изменения ширины объясняется изменением факторов рассогласования скоростей. Установлено также, что параметры модели статистически значимы.

### **Выводы**

В результате проведенного исследования с применение программного комплекса Deform-3D выполнен анализ влияния рассогласования скоростей при непрерывной прокатке на формоизменение (уширение). Установлено, что даже незначительное рассогласование скоростей (5-10%) может приводить к значительным изменениям ширины прокатываемой полосы – до 8,3 % как в большую, так и в меньшую сторону.

### **Литература**

1. Чекмарев А.П. Прокатка на мелкосортных станах/ А.П. Чекмарев, В.П. Гречко, В.В. Гетманец, Б.В. Ховрин – М.: Металлургия, 1967 – 366 с.
2. Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением/ Н.П. Громов –2-е изд., доп. - М.: Металлургия, 1978 – 360 с.
3. Фёрстер Э. Методы корреляционного и регрессионного анализа / Э. Фёрстер, Б. Рёнц. М.: Финансы и статистика 1983. – 302 с.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ РАЗНОСТЕННОСТИ ПРИ РЕДУЦИРОВАНИИ ТРУБ

*Орлов А.Г., Логинов Ю.Н.  
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»,  
Екатеринбург, Россия  
alor110@mail.ru*

Одним из известных способов уменьшения концевой разностенности труб, прокатанных на редуционном стане, является предварительное утонение концевых участков на раскатном стане с целью компенсации последующего утолщения стенки в редуционном стане [1,2]. Для разработки режимов утонения необходимо располагать экспериментальными данными по геометрии и разностенности концевых участков, а также аналитическими моделями изменения толщины стенки при прокатке. Некоторые данные применительно к ТПА-80, имеющего в своем составе 8-клетевой непрерывный и 24-клетевой редуционный станы, опубликованы нами ранее [3].

В данной работе приводятся результаты компьютерного моделирования прокатки труб в редуционном стане в программном комплексе QFORM-3D, реализующем метод конечных элементов. Моделирование выполнено для следующих исходных данных: марка стали – 45, модель среды – вязкопластическая, что соответствует условиям горячей прокатки; исходная температура трубы перед редуцированием – 900°C; показатель трения в законе Зибеля – 0,6, что соответствует условиям горячей прокатки; длина черновой трубы  $L_0 = 2700$  мм (для обеспечения 100% заполнения редуционного стана и формирования утолщенных концов); тип задачи – деформирование и теплопередача; количество конечных элементов – 56800; по толщине стенки после генерации сетки располагалось 3-4 элемента, что соответствует инструкции пользователя программным комплексом; форма элементов – тетрагональная; сохранение данных производилось каждые 100 шагов. Прохождение трубы через валки в один из моментов прокатки показано на рис. 1.

Для оценки точности и адекватности моделирования было проведено сравнение расчетных и фактических данных по изменению средней толщины стенки по длине прокатанной трубы без утонения концов. Анализ результатов решения показал, что отличие расчетных и фактических данных не превышает 9,2%, что показывает достаточную точность и адекватность моделирования и возможность его использования для дальнейшего исследования формоизменения утолщенных концов.

Перед моделированием процесса прокатки по усовершенствован-

ной технологии была построена твердотельная конечно-элементная модель черновой трубы с утоненными концами выбранного размера 94 x 5,5 мм. Форма и размеры утоненных концов были определены по фактическим данным.

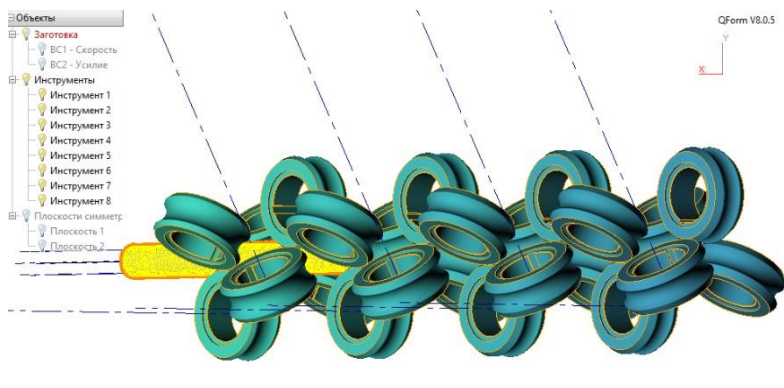


Рис. 1. Расположение валков редукционного стана

Моделирование прокатки трубы с утоненными концами в редукционном стане показало отсутствие утолщенных концов: все значения толщины стенки уложились в пределы допускаемых отклонений.

Таким образом, анализ разработанной компьютерной модели показал достаточное для инженерных расчетов совпадение расчетных и фактических данных, и подтвердил возможность получения труб без утолщенных концов при прокатке черновых труб с утоненными концами.

#### Литература

1. Данченко В. Н., Чус А. В. Продольная прокатка труб. М.: Металлургия, 1984. 136 с.
2. Патент РФ № 2 677 404. Способ изготовления труб / Орлов Г.А., Орлов А.Г. Опубл. 16.01.2019. Бюл. № 2.
3. Орлов Г.А., Орлов А.Г., Ашканов С.Е. Анализ концевой разностенности труб после редукционного стана // Известия вузов. Черная металлургия. 2017, № 3. С. 250-251.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТНЫХ УСЛОВИЙ ПРОЦЕССА ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКИ НА РАЗНОСТЕННОСТЬ ТРУБ

*Павлов Д.А., Ерпалов М.В., Владимиров А.В.  
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
Екатеринбург, Россия  
d.a.pavlov@urfu.ru*

Важной проблемой процесса продольной прокатки труб на короткой оправке является повышенная поперечная разностенность черновых труб, вызванная затеканием металла в выпуск калибра в процессе прокатки и формированием лампасов. Эта разностенность при дальнейшей прокатке черновых труб в полной мере не устраняется. Для решения описанной проблемы необходимо изучить формоизменение металла труб в процессе прокатки. Одним из основных параметров процесса, оказывающих влияние на неоднородность распределения деформации по сечению трубы, величину разностенности, а также на разогрев, является частота оборотов валков. В работе представлены результаты исследования влияния частоты оборотов валков на разностенность труб и неоднородность деформации при прокатке на раскатном стане «тандем», установленном на трубопрокатном агрегате ТПА-140 ПАО «Синарский трубный завод».

Стан тандем состоит из двух последовательно расположенных станов продольной прокатки труб (СПП-1 и СПП-2) [1]. Моделирование процесса прокатки гильзы в черновую трубу осуществлялось в программе Deform [2]. При постановке задачи температура гильзы принималась равной 1200 °С. В качестве материала заготовки использовалась сталь AISI-1045, являющаяся аналогом российской стали 45. Диаметр и толщина стенки гильзы составляли соответственно  $D_g=166$  мм и  $S_g=10$  мм. Диаметр и толщина стенки черновой трубы составляли соответственно  $D_q=160$  мм и  $S_q=7$  мм. Всего было выполнено 5 вычислительных экспериментов. Частоту оборотов валков в вычислительных экспериментах изменяли от 95 до 135 об/мин с шагом 10 об/мин. В качестве параметра, позволяющего оценить разностенность трубы и склонность к образованию дефектов на внутренней поверхности труб использовано отношение толщины стенки в выпуске к толщине стенки в вершине калибра  $S_{\text{вып}}/S_{\text{верш}}$  (рис. 1). В работе [3] было показано, что при  $S_{\text{вып}}/S_{\text{верш}} > 1,80$  велика склонность труб к образованию дефектов на внутренней поверхности. Для оценки влияния разогрева трубы в процессе прокатки на неоднородность деформации и разностенность в каждой задаче был вырезан геометрический очаг деформации в программе Deform-3D. На основе результатов вычисления безразмерного параметра  $S_{\text{вып}}/S_{\text{верш}}$  была по-

строена диаграмма (рис. 2). Из диаграммы, представленной на рис. 2 видно, что с увеличением частоты вращения валков от 95 до 115 об/мин наблюдается рост разностенности труб, так как параметр  $S_{\text{вып}}/S_{\text{верш}}$  увеличивается от 1,24 до 1,46. При дальнейшем увеличении частоты вращения валков до 125 и 135 об/мин наблюдается уменьшение разностенности труб, так как параметр  $S_{\text{вып}}/S_{\text{верш}}$  уменьшается до 1,34 и 1,31 соответственно. Таким образом, установлено, что частота вращения валков оказывает влияние на неоднородность деформации и разностенность труб. При этом существует критическое значение частоты вращения валков, при котором наблюдается наибольшая разностенность труб.

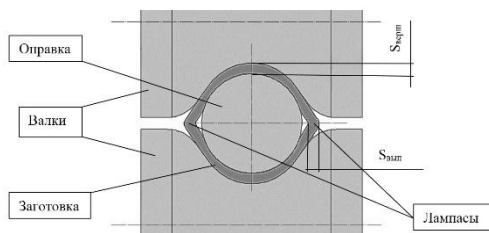


Рис. 1. Поперечный разрез очага деформации

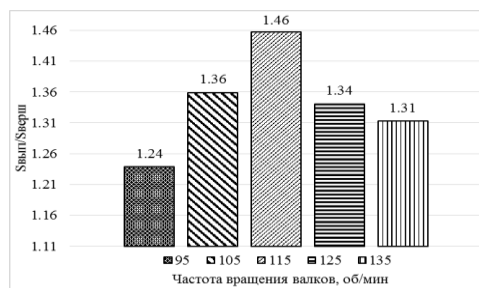


Рис. 2. Влияние частоты вращения валков на поперечную разностенность

### Литература

1. Харитонов В.В., Богатов А.А., Вахрушев В.Ю. Оборудование для прокатки, прессования и волочения труб. Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2008. 233 с.
2. Таупек И.М. и др. Общее руководство по работе с инженерным программным комплексом DEFORM/ И.М. Таупек, Е.Г. Кабулова, К.А. Положенцев, А.В. Лисовский, А.В. Макаров/ Учебное пособие. — Старый Оскол: Кириллица, 2015. — 217 с.
3. Богатов А.А. Новый способ раскатки горячедеформированных труб на короткой оправке/А.А. Богатов, Д.А. Павлов, С.В. Липнягов, В.Н. Суворов, Е.А. Павлов//Сталь. 2014. № 12, с. 49–51..

## СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ СТАЛЕЙ

*Тет Паинг, Чжо Зяя*

*МГТУ "Станкин", Москва, Россия  
thetpaing520@yandex.ru*

Смена приоритетов в технике объективно инициирует пересмотр методов обработки металлов, не получивших широкого распространения в прошлом. Одним из таких методов является термоциклирование недорогих мало- и среднеуглеродистых сталей, которое при определенных условиях приводит к существенному увеличению их прочностных характеристик. В статье приведены результаты эксперимента, моделирующего эксплуатационное термоциклирование образцов из конструкционных углеродистых сталей в интервале температур от точки фазового перехода цементита II рода до начала фазовых превращений стали. Исследовано влияние температуры, числа термоциклов и гистограммы температурного нагружения на магнитные и механические свойства исследуемых сталей. Получена функциональная зависимость коэрцитивной силы и твердости от числа термоциклов при заданной температуре. В эксперименте в качестве части контрольно-измерительной системы были использованы аттестованные и поверенные приборы -- структуроскоп (коэрцитиметр) КИМ-2М и твердомер ТКМ-459М. Нагрев проводился в печи ПКЭ-25.1. Для проведения эксперимента были сделаны специальные образцы из конструкционной качественной стали 25 (ГОСТу 1050-88), содержание углерода 0,22-0,30%. Порядок проведения эксперимента следующий: образцы закладывались в печь с заданной температурой, выдержка в печи в течение 3-5 мин (температура образца отслеживалась пирометром Testo 835-T2) и охлаждение на спокойном воздухе. Цикл повторялся. В процессе эксперимента измерялась коэрцитивная сила  $H_c$  (напряженность магнитного поля, необходимая для размагничивания намагниченного до насыщения ферромагнетика, А/м) и твердость HRB по шкале В Роквелла в условных единицах. Порядок проведения эксперимента: образцы закладывались в печь с температурой 300 °С, после прогрева всего сечения со скоростью 1 мм/мин проводилась выдержка при температуре печи 300 °С в течение 3-5 мин и охлаждение на спокойном воздухе. Цикл повторялся. Было проведено термоциклирование образцов до 20 циклов.

Результаты эксперимента для стали 25 показаны в графическом виде (рис. 1 а, б). Обозначения 1-5 относятся к номерам исследуемых образцов. Очевидно, что на третьем цикле все 5 образцов из стали 25 показали резкое повышение твердости и коррелирующей с ней коэрцитив-

ной силы (среднее значение твердости возросло после третьего цикла термоциклирования практически в 2 раза). Затем с увеличением циклов температурной нагрузки 300 °С происходит падение исследуемых величин. Увеличение магнитных свойств (коэрцитивной силы) и твердости на третьем цикле подтверждено термоциклированием плоских образцов из сталей 20 и 45 (рис.1 в, г).

Очевидно, что такое термоциклирование на третьем цикле до 2-х раз увеличивает твердость и коэрцитивную силу образцов. Затем с увеличением циклов температурной нагрузки происходит монотонное падение исследуемых величин. Однако термоциклирование этих сталей при температурах выше 300 °С (но ниже линии PSK диаграммы Fe-Fe<sub>3</sub>C, где происходит аустенитное превращение при нагреве и эвтектоидное при охлаждении) не привело аналогичному результату.

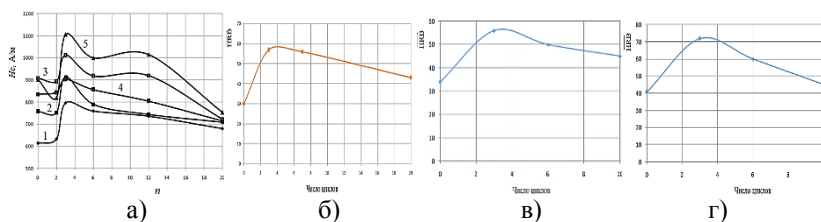


Рис. 1. Зависимость коэрцитивной силы и среднего значения твердости образцов от числа термоциклов: а), б) образцы из стали 25; в) образцы из стали 20; г) образцы из стали 45

Для исследования структуры образцов из стали 25, были сделаны микрошлифы в исходном состоянии, затем из того же образца были сделаны микрошлифы после термоциклирования температурой 300°С после 3, 7 и 20 циклов. Фотографии структур (рис. 3).

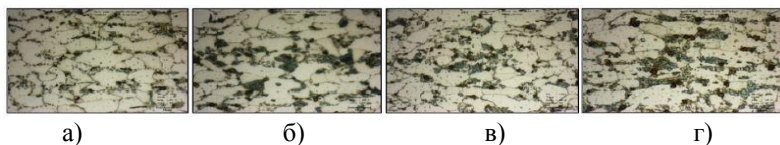


Рис. 2. Структура образца: а) в исходном состоянии; б) термоциклирование 3 цикла; в) 7 циклов; г) 20 циклов

Анализ микрошлифов показал, что такое увеличение твердости и магнитных характеристик можно лишь частично объяснить превращением перлита зернистого в пластинчатый. На данный способ получен патент. УДК 621.771.074



# ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ПРЕДЧИСТОВОГО КАЛИБРА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАПОЛНЕНИЯ КАНАВОК В ЧИСТОВОМ КАЛИБРЕ ПРИ ПРОКАТКЕ АРМАТУРНОЙ СТАЛИ

Панин Е.А.<sup>1</sup>, Кривцова О.Н.<sup>1</sup>, Лезнев С.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Карагандинский государственный индустриальный университет,  
Темиртау, Казахстан

<sup>2</sup>Рудненский индустриальный институт,  
Рудный, Казахстан  
cooper802@mail.ru

В сортопрокатном цехе АО «АрселорМиттал Темиртау» расположен непрерывный сортовой стан, запущенный в 2008 году, который предназначен для прокатки как круглых, так и арматурных профилей. Несмотря на постоянное совершенствование технологии прокатки, при производстве сортовой металлопродукции все еще велика доля выхода металла в брак. В частности, при прокатке арматурной стали распространен такой геометрический дефект, как отсутствие продольных или поперечных ребер.

Для детального изучения процесса прокатки арматурного профиля и его дальнейшей оптимизации было решено провести компьютерное моделирование в программном комплексе «DEFORM-3D». В работах [1-2] предложены наиболее рациональные, с точки зрения авторов, формы предчистовых калибров для прокатки арматурной стали - однорадиусный овал и плоский овал с двойной вогнутостью. Также, в работе [3] была предложена новая калибровка для прокатки круглой и арматурной стали, главной особенностью которой является предчистовой калибр, выполненный в виде гладкой бочки. Для оценки влияния формы предчистового калибра на деформированное состояние, провели единичное моделирование, т.е. моделирование только предчистового калибра, после которого велся расчет чистового калибра. В результате моделирования были получены следующие результаты распределения эквивалентной деформации (рис. 1).

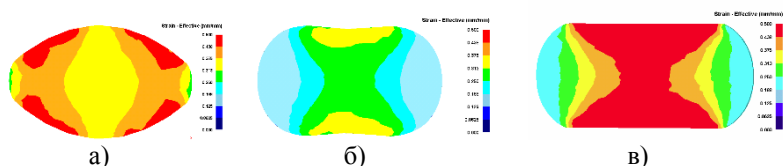


Рис. 1. Распределение эквивалентной деформации: а) однорадиусный овал; б) плоский овал с двойной вогнутостью; в) гладкая бочка

Из рассмотренных калибров наиболее равномерное распределение

деформации обеспечивает плоский овал с двойной вогнутостью, в котором разброс в вертикальном и горизонтальном направлениях примерно одинаков. В остальных двух калибрах разница разбросов довольно различная.

В результате расчета модели чистового калибра получены следующие результаты (рис. 2).



Рис. 2. Модель чистового калибра

После прокатки в чистовой клетке металл полностью заполнил контур калибра, а также винтовые врезы поперечных ребер. Продольные ребра также сформированы полностью.

Основными требованиями по геометрическим размерам, согласно ГОСТ [4], являются соответствие вертикального и горизонтального диаметров  $d_1$  и  $d_2$ , которые характеризуют высоту продольного и поперечного ребер. Значения и допускаемые отклонения диаметра  $d_2$  соответствуют приведенным в ГОСТ данным для диаметра  $d_1$ . Овальность сечения (разность между  $d_1$  и  $d_2$  в одном сечении) не должна превышать суммы плюсового и минусового предельных отклонений по размеру  $d_1$ . Помимо этого, важной характеристикой геометрии арматурной стали является величина  $t$ , определяющая расстояние между двумя соседними поперечными ребрами.

Как видно из рис. 2, значение  $d_1$  в полученной модели равно 22,569 мм, значение  $d_2$  равно 22,335 мм. Отклонение по  $d_1$  составляет 0,269 мм, по  $d_2$  – 0,035 мм, что полностью соответствует указанным значениям предельных отклонений. Овальность стержня составляет 0,234 мм, что также соответствует требованиям ГОСТ. Величина  $t$  составляет 12,66 мм, что полностью соответствует табличному значению с допускаемым предельным отклонением  $\pm 15\%$ , (в нашем случае оно равно 5%).

### Литература

1. Смирнов В.К., Шилов В.А., Инатович Ю.В. Калибровка прокатных валков. Учебное пособие для вузов. — Издание второе, переработанное и дополненное. — М.: Теплотехник, 2010. — 490 с.
2. Технология прокатного производства. Беняковский М.А., Богоявленский К.Н., Виткин А.И. и др. — М.: Металлургия, 1991. - 423 с.

3. Асанов В. Н., Стеблов А. Б., Тулупов О. Н. Совершенствование калибровки валков для прокатки круглых и арматурных профилей.// Сталь, 2008, №11. - С. 90-92.

4. ГОСТ 10884-94. Сталь арматурная термомеханически упроченная для железобетонных конструкций. 2009.-14с.

УДК 539.388.2

## **ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПРОВОЛОКИ, ПОЛУЧЕННОЙ ПОЛУНЕПРЕРЫВНЫМ ВЫТЯГИВАНИЕМ ИЗ РАСПЛАВА СЕРЕБРА**

*Первухин А.Е.<sup>1</sup> Логинов Ю.Н.<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup> АО ЕЗОЦМ, Верхняя Пышма, Россия  
a.pervuhin@ezocm.ru*

*<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
Екатеринбург, Россия  
j.n.loginov@urfu.ru*

Состояние поверхности проволочной заготовки, предназначенной для волочения, может оказаться различным. Проволочная заготовка в виде катанки может обладать поверхностными дефектами в виде закатов, продольных и поперечных трещин, раковин. Если проволочная заготовка получается методом непрерывной отливки или вытягивания из расплава, то для нее характерно наличие кольцевых дефектов в виде локальных пережимов, возникающих из-за наличия шага вытягивания. На рис. 1, а показано состояние поверхности проволочной заготовки диаметром 10 мм из серебра марки  $Sr99,99$ , полученной полунепрерывным вытягиванием на установке фирмы IKOI. Если в таком состоянии протягивать заготовку через волоку, то пластическая деформация выступов приведет к перетеканию металла во впадины с образованием плен, что ухудшит качество поверхности в готовом изделии.

На рис. 1, б показано решение задачи волочения проволоки с локализацией дефекта в виде кольцевой впадины. Выполнена оценка формоизменения дефекта при волочении и уточнено распределение показателя напряженного состояния  $K$ . Выявлено, что при продвижении через коническую зону волоки дефект такого типа уменьшается по высоте. Можно было бы предполагать, что длина дефекта будет увеличиваться пропорционально коэффициенту вытяжки. Однако этого не происходит. Скорее всего, это связано с тем, что в сторону входа и в сторону выхода из волоки относительно дефекта создаются две зоны с повышенным (по модулю) показателем напряженного состояния, на уровне  $-2$ . Тем самым начинают превалировать напряжения сжатия, которые не позволяют дефекту вытя-

гиваться по длине. Подобное несоответствие коэффициентов деформации для деформируемого материала и для расположенной в нем полости обсуждалось в работах [1, 2]. Более подробно решение такой задачи изложено в статье [3].

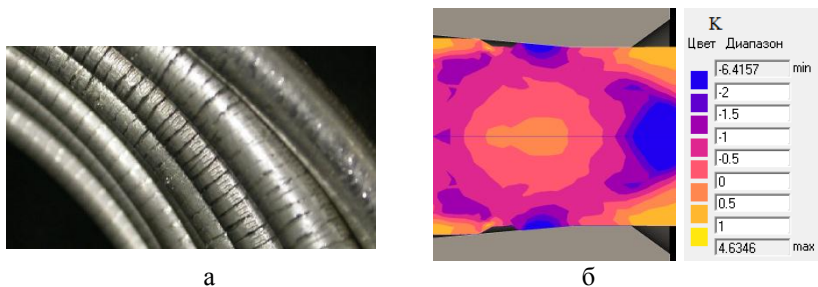


Рис. 1. Состояние поверхности проволоки (а) и оценка формоизменения дефектов при волочении (б) с распределением показателя напряженного состояния К

При формоизменении поверхностных дефектов возникает борьба двух тенденций. С одной стороны, в приповерхностном слое возникают повышенные сдвиговые деформации, которые способствуют залечиванию дефекта. Однако при этом возникает повышенное сопротивление перетеканию металла во впадины из-за повышенной нагартовки именно поверхностных слоев проволоки. Разглаживание неровных поверхностей при холодной деформации затруднено из-за нагартовки металла вблизи поверхности. В результате деформация может передаваться на глубину заготовки, при отсутствии выравнивания. Этот эффект описывался в работе [4].

### Литература

1. Логинов Ю.Н., Еремеева К.В. Формоизменение одиночно расположенной поры в круглой заготовке при волочении // Кузнечно-штамповочное производство. - 2009. - № 4. - С. 3-8.
2. Логинов Ю.Н., Еремеева К.В. Влияние типа пластической деформации на видоизменение одиночной поры // Деформация и разрушение материалов. - 2011. - № 4. - С. 40-44.
3. Логинов Ю.Н., Полищук Е.Г., Первухин А.Е. Формоизменение поверхностных кольцевых дефектов при волочении проволоки // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2018. - № 8. - С. 34-38.
4. Логинов Ю.Н. Модель деформации поверхностного слоя заготовки, пораженного дефектами // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2001. - № 4. - С. 36-40.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ БРИКЕТОВ ИЗ СЕЧКИ АЛЮМИНИЕВЫХ ПРОВОДОВ

*Первухина Д.Н.<sup>1</sup>, Логинов Ю.Н.<sup>1</sup>, Бабайлов Н.А.<sup>1,2</sup>*

*<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,*

*Екатеринбург, Россия*

*<sup>2</sup>Институт машиноведения УрО РАН,*

*Екатеринбург, Россия*

*fupi\_vs@el.ru*

В настоящее время эффективным способом утилизации электрического кабеля (проводов) с медным или алюминиевым сечением является метод механической переработки на промышленных измельчителях. В результате переработки кабель измельчается на мелкие частицы (сечку) и сортируется на цветной металл и полимерную оболочку. В дальнейшем алюминиевая сечка может быть использована [1-4]: для получения различных металлов металлотермическим способом (алюмотермия); в качестве раскислителя в сталеплавильном производстве; возвращаться в алюминиевую промышленность.

Целью работы является определение прочностных свойств брикетов, полученных методом валкового брикетирования из сечки алюминиевых проводов после их механической переработки на промышленных измельчителях (шредерах).

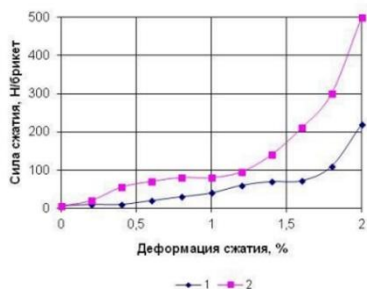
Промышленный эксперимент выполнен на промышленном валковом прессе серии ПБВ с диаметром рабочих валков 600 мм. Алюминиевая сечка перед брикетированием имела насыпную плотность 1,08 г/см<sup>3</sup>. Получены брикеты, имеющие плотность 1,97 – 2,1 г/см<sup>3</sup>.

Следует отметить, что брикеты обладали достаточной прочностью, необходимой для их транспортировки на склад или к месту их использования. Выполнено испытание брикетов на раздавливание. Выявлено, что при осадке они не разрушаются на отдельные части. Однако наблюдается осыпание частиц материала с боковой поверхности брикета. Это говорит о неравномерности уплотнения, на что можно повлиять, изменяя форму брикета [5].

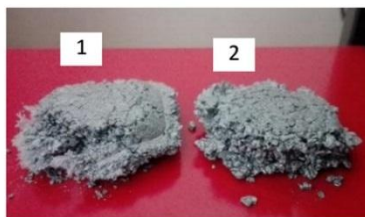
Выполнен анализ диаграммы нагружения при испытании брикетов на раздавливание (рис. 1, а). На диаграмме наблюдается сохранение постоянным усилия на протяжении некоторого времени при перемещении инструмента. Получена площадка, похожая на площадку текучести, характерную для испытания образцов из обычной стали на растяжение (площадка текучести). На диаграмме не наблюдается снижения усилия в

конец процесса, что могло бы говорить об образовании трещин или иного вида разрушения.

Сделан вывод о необходимости продолжения работы по валковому брикетированию сечки алюминиевого провода для обеспечения большей равномерности распределения плотности по длине брикета (в направлении прокатки). На рис. 1, б представлен внешний вид брикетов.



а



б

Рис. 1. Кривые испытания брикетов на раздавливание (а) и вид брикетов из сечки алюминиевого провода после деформации осевого сжатия (б): 1 и 2 номера брикетов

Кроме задач, отмеченных выше, при изготовлении брикетов из алюминиевой сечки могла быть поставлена задача изготовления брикетов для легирования алюминиевых сплавов при выплавке слябовых или прессовых заготовок. Для этого пришлось бы решить проблему создания брикетов композиционного состава, как это предлагалось в описании к патенту РФ № 2590441 [6].

### Литература

1. Gronostajski J., Marciniak H., Matuszak A. New methods of aluminium and aluminium-alloy chips recycling // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2000. – V. 106. – Iss. 1–3. – P. 34-39.
2. Загиров Н.Н., Логинов Ю.Н., Иванов Е.В. Рециклинг кусочных отходов медной проволоки в исходную длинномерную продукцию методами обработки давлением // *Вестник МГТУ им. Г.И.Носова*. – 2016. – Т.14. – С.50-55.
3. Бабайлов Н.А., Логинов Ю.Н., Полянский Л.И., Первухина Д.Н. Применение валкового брикетирования для утилизации алюминиевого провода // *Металлург*. – 2018. – № 8. – С. 3-5.
4. Polianski L.I., Babailov N.A., Loginov Yu.N., Pervukhina D.N. Industrial Recycling of Technogenic Wastes and Mineral Ore Processing // *AIP Conference Proceedings*. – 1785, – 040046 (2016); doi: 10.1063/1.4967103.

5. Логинов Ю.Н., Буркин С.П., Бабайлов Н.А. Влияние формы инструмента на граничные условия и уплотнение при валковом брикетировании. Сталь. 2000. № 9. С. 87-90.

6. Логинов Ю.Н., Бабайлов Н.А., Первухина Д.Н. Патент РФ 2590441. Брикет для легирования алюминиевого сплава. Опубл. 10.07.2016. Бюл. № 19.

УДК 621.774

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ХПТ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЖАТИЯ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ ТРУБЫ МЕЖДУ ПРЯМЫМ И ОБРАТНЫМ ХОДАМИ КЛЕТИ

*Пилипенко С.В.*

*Полоцкий государственный университет,  
Новополоцк, Беларусь  
44-08@mail.ru*

Точность расчета силовых параметров прокатки зависит от верно-го определения таких деформационных параметров, как величина обжа-тия трубы по толщине стенки вдоль конуса деформации [1-2]. Существ-вующие на данный момент зависимости для определения данной велич-ины имеют те или иные степени упрощения и дают определенную ошибку [3-4]. Автором (в соавторстве) была выведена зависимость, позволяющая более точно определять величину обжатия по толщине стенки вдоль ко-нуса деформации при прямом ходе клетки (и, как следствие, распределе-ние величины обжатия между прямым и обратным ходами) [3]:

$$\Delta S_{np_x} = \frac{m \cdot \pi (D_i - S_g) S_g \cdot (tg \gamma - tg \alpha)}{4 \left( \frac{0.5\pi - \alpha}{2} (R_{mp_x}^2 - R_{on_x}^2) + 0.5 \arcsin \left( \frac{0.5B \cdot \sin(\pi - \alpha)}{\rho_g} \right) (\rho_g^2 - (\rho_g - S_g)^2) \right) + \pi \cdot (D_i + \Delta_{ypr_x}) \Delta_{ypr_x}} \quad (1)$$

где  $\Delta_{ypr}$  – величина упругих деформаций при прямом ходе;  $S_g$  – толщина стенки в выпусках;  $\alpha$  – угол выпуска в радианах;  $R_{mp_x}$  и  $R_{on_x}$  – радиус трубы и оправки в сечении конуса согласно калибровке;  $\rho$  – радиус вы-пуска калибра;  $B$  – ширина калибра.

Используя эту формулу выполнены исследования о влиянии вели-чины развалки ручья калибра и величины пружины клетки стана ХПТ на распределение величины обжатия между прямым и обратным ходами клетки.

Для анализа степени влияния параметров развалки или изменение величины пружины клетки на распределение  $\Delta S_{\Sigma}$  между прямым и обрат-ным ходами выбран маршрут прокатки труб 50,8x4,75-38,1x2,3, стан ХПТ-55. Рассчитана калибровка, рассчитаны все деформационные и си-

ловые параметры (по данной калибровке изготовлен деформационный инструмент и прокатана промышленная партия труб).

Степень влияния величины развалки на распределение  $\Delta S_{\Sigma}$  между прямым и обратным ходами определялась следующим образом: рассчитана величина  $\Delta S_{np}$  (рис. 1) при стандартной для данного маршрута величине развалки [1-4]; рассчитаны величины  $\Delta S_{np}$  при увеличении величины развалки во всех сечениях конуса на 50 и на 100%, а так же, уменьшении ее значений на 50 %.

Степень влияния величины упругих деформаций клетки на распределение  $\Delta S_{\Sigma}$  между прямым и обратным ходами определялась следующим образом: рассчитана величина  $\Delta S_{np}$  (рис. 1) при стандартной для данного маршрута величине пружины клетки ( $\Delta y_{упр}$ ) [1]; рассчитана величина  $\Delta S_{np}$  при увеличении во всех сечениях величины  $\Delta y_{упр}$  на 10, 50 и на 100% (тоже при уменьшении на 10, 50 и на 90%).

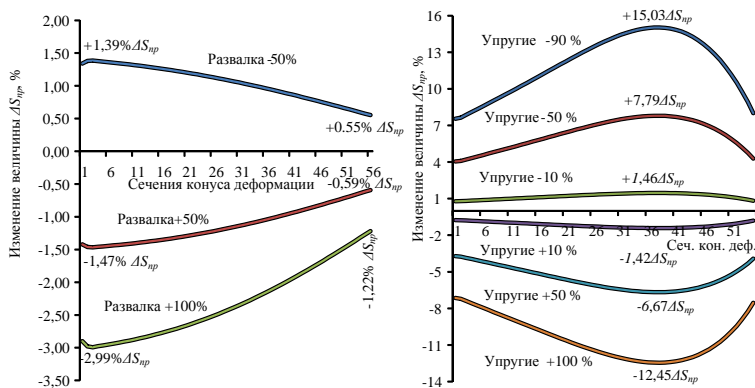


Рис. 1. Влияния величины развалки и величины упругих деформаций клетки на величину обжатия по толщине стенки вдоль конуса деформации при прямом ходе клетки ( $\Delta S_{np}$ )

Исследования показали, что величина упругих деформаций клетки оказывает большее влияние на распределение величины обжатия между прямым и обратным ходами клетки, чем величина развалки, однако не учитывать влияние последнего фактора при расчете параметров процесса ХПТ не корректно. Материалы доклада могут быть полезны при расчетах силовых и деформационных параметров процесса ХПТ, а также при проектировании новых станов ХПТ, или выборе путей реконструкции старых.

### Литература

1. Шевакин Ю.Ф. Калибровка и усилия при холодной прокатке труб. - М: Металлургиздат, 1963. - 269 с.



2. Емельяненко П.Т. Теория кривой и пилигримовой прокатки. - М: Металлургиздат, 1949. – 491 с.

3. Пилипенко С.В. Метод расчета величины обжатий по толщине стенки вдоль конуса деформации станов холодной пильгерной прокатки труб: [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.metaljournal.com.ua/calculation-method-of-thickness-reduction-value-along-the-cone-of-deformation-of-cold-pilger-pipe-rolling-mills/> (дата обращения: 09.02.2019).

4. Орро П.И. Производство стальных тонкостенных труб. - Харьков: Металлургиздат, 1951. - 416 с.

УДК 621.7.011

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОБОДНОГО УШИРЕНИЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6**

*Постыляков А.Ю., Шварц Д.Л., Михайленко А.М.  
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
Екатеринбург, Россия  
a.i.postyliakov@urfu.ru*

Основными факторами, влияющими на уширение при прокатке, являются диаметр валков, обжатие и ширина полосы. Они относительно легко поддаются измерению и входят почти во все формулы расчета уширения [1]. Однако, значительное влияние на уширение оказывают и факторы, связанные с реологическими свойствами деформируемого материала. Они значительно сложнее поддаются формализации и обычно учитываются в формулах через введение различных поправочных коэффициентов [1, 2]. При моделировании методом конечных элементов их учет осуществляют заданием кривых сопротивления деформации, однако часто и это не является исчерпывающим в связи с многообразием имеющихся кривых даже для одного материала [3, 4].

Промышленные сплавы титана принято классифицировать на группы в зависимости от соотношения между  $\alpha$  и  $\beta$ -фазами в нормализованном состоянии. При этом механизмы деформации  $\alpha$  и  $\beta$ -фаз существенно отличаются [5], что связано с разным типом их кристаллической решетки и количеством систем скольжения. Соответственно, принадлежность сплава к той или иной группе, а также его предшествующая обработка при прочих равных условиях будут влиять на соотношение между вытяжкой и уширением при прокатке.

Целью работы являлось исследование уширения при прокатке

( $\alpha+\beta$ )-сплава ВТ6 и сравнение результатов с полученными при моделировании МКЭ.

Образцы для выполнения экспериментальной части исследования представляли собой одинаковые квадратные полосы с длиной сторон равной 16 мм. После нагрева до температуры 930 °С ( $T_{\text{пн}} - 50$  °С), и выдержки осуществляли их прокатку на стане 130 с различной величиной обжатия. Измерение размеров полос выполняли сразу после прокатки. Идентичность состояния образцов перед прокаткой, принятая при обработке данных, обусловлена одинаковыми условиями их отбора и предшествующей обработки.

Геометрические, скоростные и температурные параметры моделирования назначили соответственно условиям проведения эксперимента. Кривые сопротивления деформации для материала построены согласно данным работы [3]. Значение показателя трения в законе Зибеля составляет 1, что соответствует условиям прокатки сильно окисленного титана без смазки.

По полученным экспериментальным и модельным данным построили график (рис.1) зависимости коэффициента уширения от коэффициента обжатия.

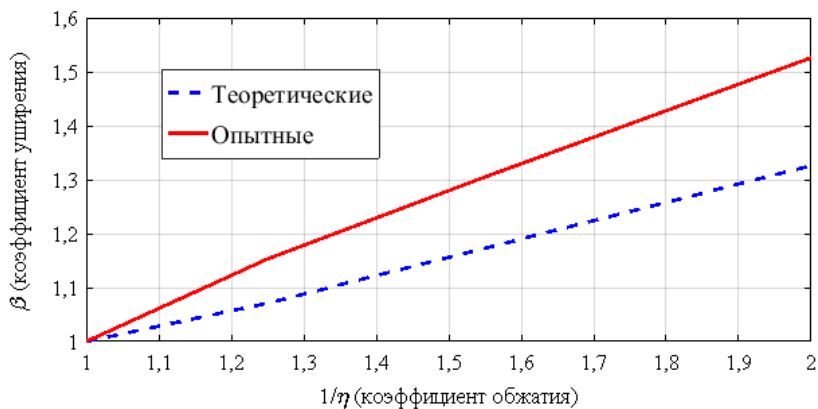


Рис. 1. Зависимость экспериментальных и теоретических значений коэффициента уширения от коэффициента обжатия

Из графика (см. рис. 1) видно, что опытные значения коэффициента уширения оказываются значительно больше теоретических (в среднем в 1,8 раза), причем меньшим значениям коэффициента обжатия соответствуют большие значения отклонения (более чем в 2 раза). Принимая во внимание, что при моделировании было задано максимально возможное

значение показателя трения, полученный результат также соответствует наибольшему уширению.

Таким образом, выбранные кривые имеют недостаточную степень точности в отношении реологических свойств материала, что приводит к значительным отклонениям при моделировании.

#### Литература

1. Кривенцов А.М. Исследование и определение уширения при горячей прокатке в гладких и калиброванных валках // Калибровочное бюро. – 2015. – № 6. – С. 6–39.

2. Шилов В.А. Уширение при прокатке в калибрах с учетом реологических свойств металла / В.А. Шилов, В.К. Смирнов, Ю.В. Инатович // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1995. – № 4. – С. 39 – 42.

3. Харитонин С.В. Аналитические зависимости для определения сопротивления деформации титановых сплавов / С.В. Харитонин, В.И. Степаненко, К.И. Литвинов, В.А. Волков, А.Р. Бондин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1994. – № 11. – С. 5 – 6.

4. Kotkunde N. Microstructure study and constitutive modeling of Ti–6Al–4V alloy at elevated temperatures / N. Kotkunde, H.N. Krishnamurthy, P. Puranika, A.K. Gupta, S. K. Singh // Materials and Design. – Materials and Design. – 2014. – Vol. 54. – P. 96 – 103.

5. Kim J.H. Constitutive analysis of the high-temperature deformation mechanisms of Ti–6Al–4V and Ti–6.85Al–1.6V alloys / J.H. Kim, S.L. Semiatin, C.S. Lee // Materials Science and Engineering A. – 2005. – Vol. 394. – P. 366–375.

УДК 621.771.013

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОСКОЙ ПРОКАТКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ УСЛОВИЯ ПЛАСТИЧНОСТИ ХИЛЛА

*Пузанов М.П.<sup>1,2</sup>, Логинов Ю.Н.<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup> ООО ВИЗ-Сталь, Екатеринбург, Россия*

*<sup>2</sup> ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,*

*Екатеринбург, Россия*

*e-mail puzanovmp@yandex.ru*

Значительный объем трансформаторной стали выпускается в анизотропном исполнении в виде листового проката [1]. Чаще всего здесь имеется в виду наличие анизотропии магнитных свойств, что позволяет изготавли-

вать электрические машины и трансформирующие устройства в наиболее эффективном исполнении. Обычно при листовой прокатке основное внимание уделяют достижению необходимой планшетности [2]. Меньше внимания до сих пор уделялось анизотропии механических свойств, а также влиянию скорости прокатки на сопротивление деформации этого вида стали [3]. Целью исследования явилась оценка влияния анизотропии механических характеристик стали на процесс плоской прокатки.

При постановке такой краевой задачи чаще всего заменяют условие текучести Мизеса на условие текучести Хилла. В результате решения получают предпочтительное пластическое течение материала в сторону действия наименьших механических сопротивлений [4].

Задачу решали методом конечных элементов в программном комплексе «Deform-3D». Упругие свойства и закон упрочнения деформируемой среды принимали стандартными для трансформаторной стали. Условие текучести задавали уравнением Хилла, при этом коэффициенты анизотропии были определены в результате проведения комплекса дополнительных испытаний. Твердотельные модели валков и заготовки создавали при помощи программы «Компас-3D». Деформирующий инструмент – идеально жёсткие валки диаметром  $D = 70$  мм с цилиндрической профилировкой. Начальная толщина заготовки  $h_0 = 0,70$  мм, прокатка велась за один проход с получением проката толщиной  $h_1 = 0,50$  мм при относительном обжатии  $\varepsilon = 29$  %. Величину коэффициента трения установили  $\mu = 0,15$ . Указанные параметры прокатки приняты в соответствии с условиями промышленного производства данной стали. На заготовке создана сетка из тетрагональных конечных элементов, общее количество элементов равнялось 110204. Для решения использовали метод Ньютона-Рафсона.

Параллельно выполнено решение задачи с использованием условия текучести Мизеса. Это позволило сравнить результаты решения по распределению напряжений и деформаций.

На рис. 1 представлена эпюра напряжения  $\sigma_{zz}$  в очаге деформации при прокатке анизотропной полосы. Видна локализация наибольших по модулю напряжений примерно на середине длины очага деформации. В целом, решение задачи показало, что характер анизотропии материала оказывает значимое влияние на напряжённо-деформированное состояние полосы при деформации и энергосиловые параметры процесса.

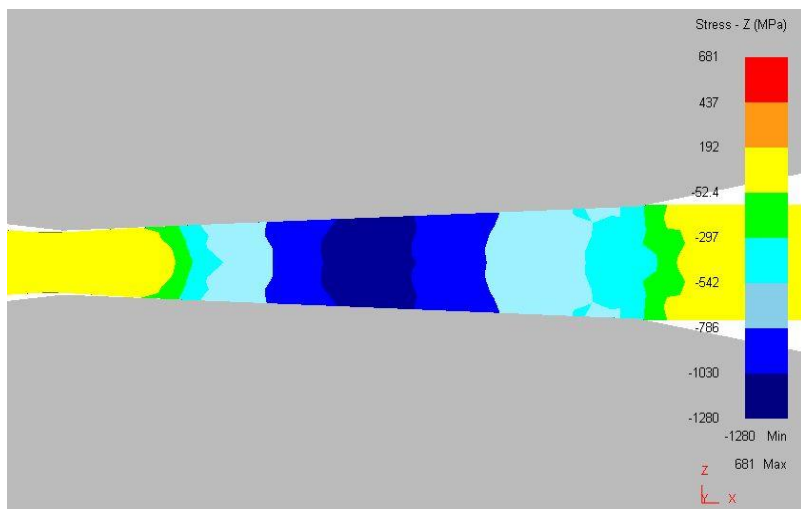


Рис. 1. Напряжение  $\sigma_{zz}$  в очаге деформации при моделировании холодной прокатки трансформаторной стали с применением условия текучести Хилла

#### Литература

1. Логинов Ю.Н., Пузанов М.П., Соловей В.Д. Силовой и скоростной режимы холодной прокатки трансформаторной стали // Сталь. – 2017. – № 8. – С. 30–33.
2. Логинов Ю.Н., Пузанов М.П., Урицкий А.Г. Исследование причин деформации кромки тонколистовой электротехнической стали и улучшение ее плоскостности // Сталь – 2017. – № 4. – С. 29–34.
3. Solovei V.D., Loginov Yu.N., Puzanov M.P. Evaluating the flow stress of electrical steel under cold rolling in terms of the strain-rate hardening effect // AIP Conference Proceedings. – 2016. – V. 1785. – P. 040075-1 – 040075-4.
4. Логинов Ю.Н., Пузанов М.П. Моделирование процесса осадки цилиндрической заготовки при использовании условия текучести Хилла. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2017. – № 9. – С. 11–16.

## **РЕЦИКЛИНГ МЕТАЛЛОЛОМА ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ НА СТАНЕ РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОЙ ПРОКАТКИ**

*Салько О.Ю.<sup>1</sup>, Найзабеков А.Б.<sup>1</sup>, Лежнев С.Н.<sup>1</sup>, Родченков М.Н.<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup> Рудненский индустриальный институт,*

*Рудный, Казахстан*

*<sup>2</sup> Акмолинский филиал АО «Казвторчермет»,*

*Нур-Султан, Казахстан*

*salko.1990@mail.ru*

Для многих развивающихся стран, в том числе и для России и Казахстана, одной из важнейших задач является улучшение экологической обстановки в стране. Данную задачу можно решить путем утилизации отходов различных производств и дальнейшее их потребление. В связи с этим уже давно во всем мире уделяется большое внимание разработке различных способов, как утилизации отходов, так и их переработки, т.е. рециклинга. Это относится и к «железному мусору», который составляет особую категорию отходов, и называется металлоломом. Доказанным фактом является то, что идеальным решением для утилизации металлолома является вторичная переработка его с целью дальнейшего использования для нужд человека.

Одним из самых простых способов переработки лома черных металлов является его переплавка и дальнейшее вторичное использование. Но в настоящее время набирает оборот и другой способ переработки, вышедших из строя металлоизделий, это технология рециклинга, путем обработки этих металлоизделий с применением горячей радиально-сдвиговой деформации. И одной из таких технологий является инновационная технология рециклинга насосных штанг в условиях ОАО «Очерский машиностроительный завод» [1] и бывших в эксплуатации железнодорожных осей [2].

Мы же предлагаем использовать данную технологию и для переработки обычного металлолома черных металлов и сплавов, который имеется в настоящее время в Акмолинском филиале АО «Казвторчермет» в большом количестве и различной номенклатуры (длинномерные прутки и короткие обрезки различного диаметра, а так же арматура различного диаметра и длины), с целью получения высококачественного торгового продукта в виде прутков круглого поперечного сечения с мелкозернистой градиентной структурой и повышенным уровнем механических свойств.

С целью подтверждения возможности осуществления рециклинга различного металлического лома был проведен лабораторный эксперимент на стане радиально-сдвиговой прокатки в условиях кафедры «Металлургия и горное дело» Рудненского индустриального института.

В качестве исходной заготовки был выбран кусок арматуры диаметром 32 мм и длиной 500 мм. Прокатку арматуры на стане радиально-сдвиговой прокатки осуществляли следующим образом: исходный кусок арматуры предварительно нагревали в трубчатой печи сопротивления до температуры начала деформирования 1200<sup>0</sup>С и выдержке при данной температуре. После нагрева заготовка подавалась к трехвалковой клети прокатного стана с коническими валками, которые за счет сил контактного трения захватывали её и за счет смещения осей валков, обеспечивали осевую составляющую сил прокатки, и, следовательно, поступательное движение прокатываемой заготовки. После нескольких проходов уже подстывшая заготовка отправлялась на подогрев и потом опять прокатывалась до необходимого диаметра, в нашем случае до диаметра 18 мм. После осуществления процесса прокатки нами были подготовлены микрошлифы из исходной заготовки в виде арматуры и из полученного прутка диаметром 18 мм.

Проведенный анализ микроструктуры показал, что исходная структура арматуры имеет равноосные зерна феррита и перлита в техническом железе. Также следует отметить, что зерна и их границы видны достаточно чётко, структура неоднородна, в структуре имеются зёрна различной формы и размеров. В структуре исходной заготовки видны тёмные и светлые пятна. Тёмные пятна говорят о том, что помимо феррита в структуре присутствует перлит. Благодаря нагреву и выдержке в микроструктуре металла произошло заметное перестроение решётки, а также образование новых, "здоровых" зёрен, как феррита, так и перлита. После деформирования расположение зёрен в структуре металла стало менее хаотичным, и более упорядоченным. В том числе произошло заметное измельчение размера зерна по всему сечению заготовки по сравнению с исходной структурой арматуры. При этом ближе к поверхности заготовки наблюдаются более мелкие зёрна, более-менее округлой формы, тогда как в центре заготовки структура зерна имеет вытянутые зерна, причём в хаотичных направлениях, но при этом всё равно структура мелкозернистая, что позволяет нам прогнозировать существенное повышение механических свойств готового горячекатаного прутка.

**Вывод:** проведенные исследования подтвердили не только возможность переработки различных отходов черных металлов, в том числе и арматуры, с получением торгового продукта в виде металлического прутка, но и возможность получения при этом мелкозернистой структурой, что обеспечит существенное повышение механических свойств, а соответственно и качество получаемых металлоизделий.

## Литература

1. Инновационная технология рециклинга насосных штанг с применением технологии и министанов радиально-сдвиговой прокатки в условиях ОАО «Очерский машиностроительный завод»/ Галкин С.П., Романцев Б.А. и др./ Инженерная практика, 2014 №9. – С. 58-61.

2. Гревцева В.В., Галкин С.П. Экспериментальное опробование технологии повторного использования железнодорожных осей с применением радиально-сдвиговой прокатки./ 72-е Дни науки студентов НИТУ "МИСиС", 2017(<https://4science.ru/events/sciencedays72/theses/8a1ce0bac4434463b73d23a21350cf08>).

УДК 621

### **РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ МОДЕЛИ ОТКАЗОВ ШАРНИРОВ УНИВЕРСАЛЬНЫХ ШПИНДЕЛЕЙ И СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ДОЛГОВЕЧНОСТИ НА ОСНОВЕ КИНЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА К РАЗРУШЕНИЮ МАТЕРИАЛОВ**

*Анцупов А.В. (мл.), Смолкин Д.А., Макарова П.В.  
Магнитогорский государственный технический  
университет им. Г.И. Носова,  
Магнитогорск, Россия  
sav123.dima@yandex.ru*

Как показывает практика, шарниры УШ выходят из строя либо по критерию прочности лопасти или вилки, либо по критерию износостойкости бронзовых вкладышей.

Анализ известных исследований показывает, что несмотря на динамический характер нагружения элементов шарниров, большинство известных прочностных моделей их отказов представляют собой различные виды статических условий прочности.

Однако статические условия прочности позволяют оценить только работоспособность элементов шарнира, но не дают возможность прогнозировать их ресурс.

Поэтому в этой работе была создана комплексная модель отказов шарниров УШ по основным критериям работоспособности, а также теоретическая оценка эффективности различных способов повышения их долговечности.

Разработанная комплексная модель состоит из 3-х физико-математических моделей отказов УШ по различным критериям:

- по критерию прочности лопасти;
- по критерию прочности вилки;
- по критерию износостойкости вкладышей.



Особенностью разработанных моделей является тот факт, что они учитывают последовательность прокатки партий полос от первой до той предельной партии полос, при прокатке которой возникает отказ шарнира по 1му, 2му или 3му критерию

По каждой разработанной модели был создан свой блочный алгоритм оценки ресурса шарнира УШ.

Далее было проведено теоретическое исследование эффективности различных способов повышения долговечности универсальных шпинделей для наиболее нагруженных шарниров седьмой клетки стана 2000 г/п ПАО «ММК», расположенных со стороны рабочей клетки.

На начальном этапе исследований было выяснено, что самой нагруженной частью УШ является вкладыш. Тогда дальнейшие теоретические исследования были посвящены поиску эффективных решений по повышению износостойкости и ресурса вкладышей скольжения.

Опираясь на данные этих исследований, к промышленным испытаниям рекомендована новая конструкция вкладышей с полимерными вставками (рис. 1), которые при работе обеспечивают фторопластовое покрытие поверхностей трения.

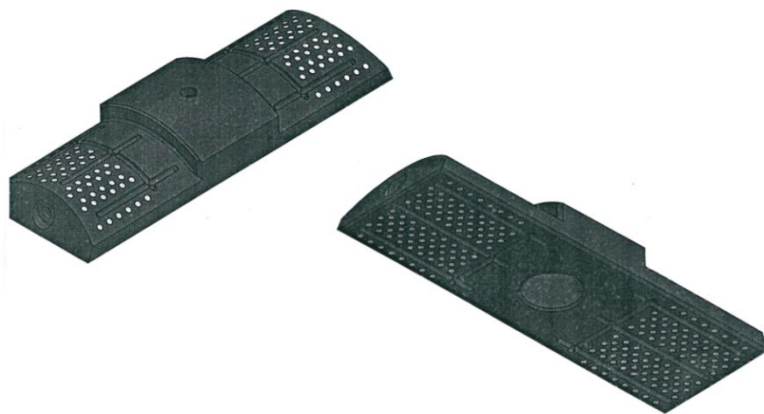


Рис. 1. Конструкция вкладыша скольжения, предложенная для испытаний на стане 2000 г/п

#### Литература

1. Модель параметрических отказов валковых систем кварто по различным критериям / Анцупов А.В., Анцупов А.В., В.П. Анцупов и др. // Производство проката. 2015. № 2. С. 35-42.
2. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход: пер. с нем. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.
3. Гребенник З.М. Гордиенко А. В., Цапко В. К. Повышение на-

дежности металлургического оборудования: Справочник.- Л. : Металлургия, 1988.- 681с

4. Анцупов А.В. (мл.), Анцупов А.В., Анцупов В.П. Аналитический метод проектной оценки ресурса элементов металлургических машин // Известия вузов. Черная металлургия. 2017. Том 60. №1. С.30-35.

УДК 621.135.2

## МОНИТОРИНГ РАБОТЫ РАСТЯЖНОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ПРАВКИ ПОЛОС ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

*Соболев Д. О., Логинов Ю.Н.  
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
Екатеринбург, Россия  
megasplaw@mail.ru*

Наряду с применением роликотправильных машин в технологии производства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов применяется метод правки растяжением [1]. Современное оборудование снабжается системами мониторинга, с помощью которых можно отслеживать линейные перемещения и усилия. Эти данные с помощью ЭВМ пересчитываются на степени деформации и напряжения. В качестве примера на (рис. 1) приведена диаграмма записи показаний мониторинговой системы правильно-растяжной машины в случае правки растяжением плиты габаритами 50,3 x 1690 x 7200 мм из сплава 2017 (отечественный аналог дюралюминий Д1) в закаленном состоянии.

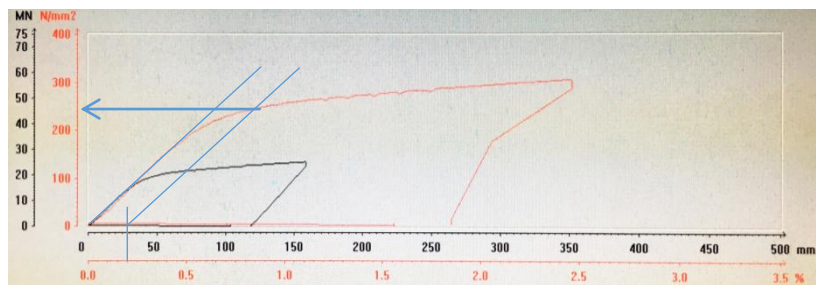


Рис. 1. Диаграмма записи показаний мониторинговой системы правильно-растяжной машины

Как видно из рисунка, фиксируются текущие значения перемещений, относительного удлинения, усилий и условных напряжений. Тем

самым создается возможность получить графики кривой упрочнения сплава, хотя бы в области малых деформаций.

Проверка правильности определения модуля упругости показывает следующее. Проведение прямой линии из начала координат, касательной к началу графика приводит к тангенсу угла наклона 42000 МПа, что меньше справочного значения модуля упругости сплава 72,4 ГПа на 42%. Такая существенная разница объясняется недостаточно высокой жесткостью правильно-растяжной машины: часть упругой деформации приходится на узлы и детали. Поэтому величина упругой деформации для самого полуфабриката не может быть определена точно.

Одним из показателей, которые можно определить из диаграммы, является условный предел текучести. Для этого из начала координат проведена линия  $OA$ , касательная к началу линии графика. Из точки с абсциссой 0,2% проведена вспомогательная линия  $LD$  до пересечения со второй осью абсцисс. Из полученной точки проведена линия  $DC$ , параллельная линии  $OA$ , до пересечения с линией графика. Полученная точка пересечения  $M$  имеет ординату, равную условному пределу текучести, что отмечено горизонтальной стрелкой.

Фиксированное значение условного предела текучести равно 245 МПа. Оно меньше справочного значения для сплава 2017 (<http://www.matweb.com>), равного 276 МПа. Разница объясняется состоянием сплава, для которого наибольшая прочность достигается не при закалке, а при старении.

Использование правильно-растяжной машины как испытательного средства позволяет выполнить оценку прочностных свойств сплавов, хотя бы в области малых деформации, не прибегая к вырезке контрольных образцов, что особенно важно из-за склонности алюминиевых сплавов к высокой дисперсии свойств [2], которая проявляется при горячей прокатке вследствие неоднородности деформации по длине и толщине проката [3,4], и может быть унаследована после термической обработки. Измерение свойств целиком в объеме полуфабриката позволяет автоматически усреднить полученные значения.

### Литература

1. Логинов Ю. Н. Влияние структуры прессованной полосы алюминиевого сплава 6061 на изменение ее поперечных размеров при правке растяжением // Цветные металлы. - 2002. - № 7. - С. 71-74.
2. Логинов Ю.Н., Головин М.А., Снегирев И.В. Статистический анализ механических свойств плоского проката из алюминиевого сплава системы Al-Cu-Mg-Fe-Ni // Технология легких сплавов. - 2017. - № 1. - С. 29-34.
3. Лобанов М.Л., Логинов Ю.Н., Данилов С.В. и др. Влияние скорости горячей прокатки на структурно-текстурное состояние плиты алюми-

ниевое сплава системы Al - Si – Mg // *Металловедение и термическая обработка металлов.* - 2018. - № 5 (755). - С. 49-54.

4. Данилов С.В., Резник П.Л., Лобанов М.Л. и др. Влияние горячей прокатки на анизотропию механических свойств алюминиевого сплава 6061 // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallургия.* - 2017. - Т. 17. - № 1. - С. 73-80.

УДК 621.771.074

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММЫ SIMUFACT FORMING ДЛЯ СОЗДАНИЯ МОДЕЛИ ПРОФИЛЕГИБОЧНОГО СТАНА**

*Толкушкин А.О.<sup>1</sup>, Панин Е.А.<sup>2</sup>, Лежнев С.Н.<sup>3</sup>*

*<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
Екатеринбург, Россия*

*<sup>2</sup>Карагандинский государственный индустриальный университет,  
Темиртау, Казахстан*

*<sup>3</sup>Рудненский индустриальный институт,  
Рудный, Казахстан  
a.o.tolkushkin@urfu.ru*

Профилегибочный стан, расположенный на кафедре ОМД Карагандинского государственного индустриального университета, предназначен для формовочных операций гибки с целью получения листовых гнутых профилей [1-2]. Форма получаемого гнутого профиля зависит от конструкции валков в клетях и их взаимного расположения.

Для детального изучения процесса профилегибки было решено провести компьютерное моделирование в программном комплексе «Simufact Forming». Несмотря на то, что данный процесс деформирования относится к прокатному типу, создание модели по принципу моделирования прокатки будет заведомо ошибочным – при моделировании прокатки одним из основных параметров является обжатие в валках, прокатка в которых возникает за счет действия сил контактного трения. Однако при операции профилегибки толщина исходного материала остается неизменной, меняется лишь его форма. Поэтому при создании модели необходимо обеспечить постоянную величину толщины листовой заготовки. Для этого были сделаны следующие допущения при создании граничных условий:

1) боковые торцы заготовки получают фиксацию по перемещениям в направлении профилегибки, т.е. заготовка в процессе деформирования остается неподвижной в продольном направлении (рис. 1);



Рис. 1. Фиксация заготовки в пространстве

2) все прокатные валки, помимо вращательного движения вокруг своих осей, получают поступательное движение в направлении заготовки, т.е. при моделировании профилегибки не заготовка движется через валки (как при прокатке), а валки движутся через заготовку, формируя её.

В результате была получена модель многопроходного деформирования листовой заготовки на профилегибочном стане (рис. 2). Учитывая симметричность получаемой детали, для ускорения расчета была смоделирована  $\frac{1}{2}$  ширины заготовки.

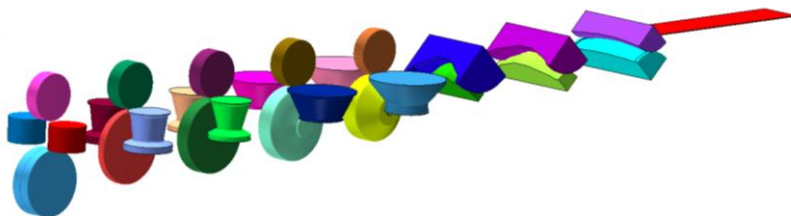


Рис. 2. Модель профилегибочного стана

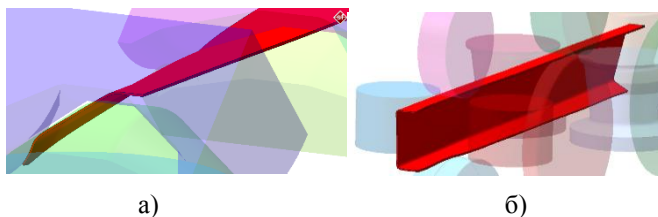


Рис. 3. Этапы деформирования

Заготовка, последовательно попадая в клетки стана, подвергается постепенной формовке в поперечном направлении. В первых клетях происходит изгиб концевых участков заготовки (рис. 3а), с постепенным приданием заданной формы профиля. В последних клетях формируется окончательная форма гнутого профиля (рис. 3б). Толщина заготовки при этом остается постоянной, исключение составляют участки пластического изгиба, где толщина уменьшается на 5-7%.

Использование данного программного обеспечения позволяет достаточно точно моделировать существующие и новые технологические

линии производства гнутых профилей и снизить затраты за счет того, что нет необходимости каждый раз осуществлять проверку их адекватности на реальном оборудовании.

### **Литература**

1. ГОСТ 14350-80. Профили проката гнутые. Термины и определения.
2. Гнутые профили проката. Справочник. И.С. Тришевский, Н.М. Воронцов, Ю.В. Дзина, Г.В. Донец, С.В. Зеленский, Ф.И. Скоков, В.И. Мирошниченко, М.Е. Докторов, В.Н. Гужа, Ю.Д. Роргачев. М.: Металлургия, 1967. — 379 С.

УДК 621.771.261

## **РАЗРАБОТКА БЛОК-СХЕМЫ КОНЦЕПЦИИ ДВУХЭТАПНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ КАЛИБРОВКИ ВАЛКОВ ДЛЯ ПРОКАТКИ ШВЕЛЛЕРОВ**

*Устинова Е. И., Шварц Д. Л., Михайленко А. М.  
ФГАОУ ВО «Уральский Федеральный Университет имени первого Пре-  
зидента России Б. Н. Ельцина,  
Екатеринбург, Россия  
ustinova1694@gmail.com*

В настоящее время любой сортовой профиль проката можно получить, используя огромное количество различных калибровок прокатных валков [1]. Именно поэтому встает вопрос выбора оптимальной калибровки валков для конкретного вида профиля на конкретном прокатном стане.

В работах [2, 3] предлагается способ оптимизации калибровки валков для прокатки швеллеров, основанный на «Концепции двухэтапной калибровки валков», разработанной на кафедре Обработки металлов давлением Уральского Федерального Университета. Суть данной концепции поясняется блок-схемой оптимизации (рис.1), согласно которой оптимизация калибровки осуществляется в два этапа. На первом этапе осуществляется выбор оптимальной схемы калибровки, а на втором – выбор оптимального режима обжатий для выбранной оптимальной схемы калибровки.

Данная блок-схема была разработана для оптимизации калибровки различных сортовых профилей, поэтому во время построения математической модели оптимизации калибровки валков для прокатки швеллеров, она была несколько расширена (рис. 2).



Рис. 1. Блок-схема «Концепции оптимальной калибровки валков» [2]

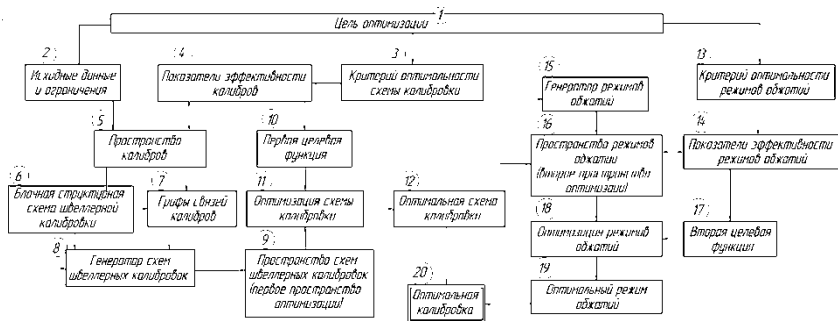


Рис. 2. Блок-схема «Концепции оптимальной калибровки валков» для прокатки швеллеров

Также осуществляется разработка компьютерной программы, предполагающей нахождение оптимальной калибровки для различных сортовых и простых профилей, основанной на данной концепции.

В настоящее время практически полностью разработан интерфейс программы (рис.3), а также решена задача разработки модуля НСИ (нормативно-справочной информации).

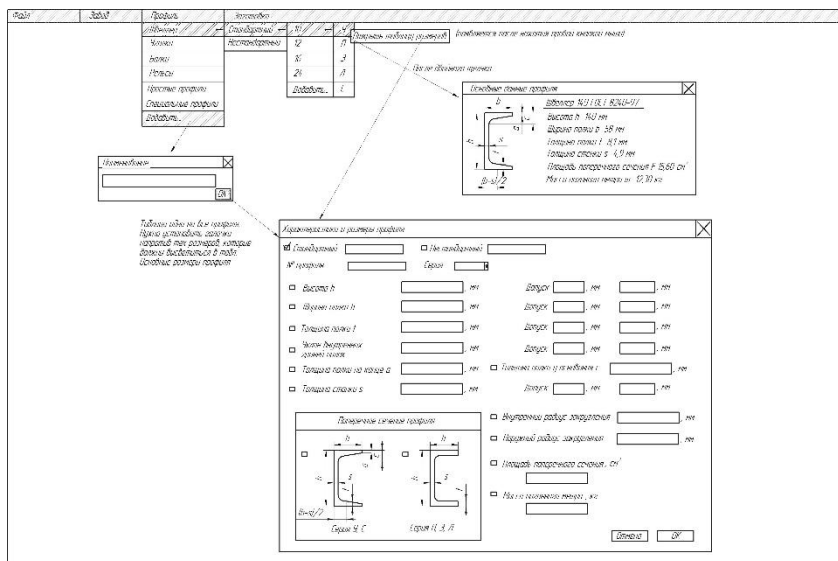


Рис. 3. Пример вида рабочего пространства при выборе

### Литература

1. Смирнов В.К., Шилов В.А., Инатович Ю.В. Калибровка прокатных валков. Учебное пособие для вузов. Издание 2-е переработанное и дополненное, Москва, 2010, 490 с.

2. Михайленко А. М., Шварц Д. Л. Концепция оптимальной калибровки сортопрокатных валков. Сообщения 2. Пространство калибров, Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 2018, том 61. № 5. С. 364-371.

3. Е. И. Устинова, А. М. Михайленко, Д.Л. Шварц, Выбор оптимальной схемы калибровки валков для прокатки швеллеров, как первого этапа оптимизации, Механическое оборудование металлургических заводов, 2018, № 1 (10). С. 72-82



## **СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ЧИСТОГО СЕРЕБРА (99,99%) ПРИ БОЛЬШИХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЯХ**

*Хаматов Д.Д.<sup>1,2</sup>, Логинов Ю.Н.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Уральский Федеральный Университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> АО «Екатеринбургский завод ОЦМ»,  
Верхняя Пышма, Россия  
khamatovdd@yandex.ru

В качестве конструкционного материала серебро редко используется в чистом виде. Однако существуют отрасли, где возникает необходимость применения материалов с высокой электро- и теплопроводностью, где серебро используют наравне с чистой медью. При этом более высокая стоимость серебра по отношению к стоимости меди заставляет ограничить сферу его применения как проводника электрического тока в микроэлектронике. Устройства слаботочной аппаратуры требуют применения тонких проводов, поэтому основным методом получения тонкой и тончайшей проволоки является процесс волочения.

Для корректного назначения параметров волочения необходимы сведения о технологических свойствах серебра, которых нет в литературных источниках.

Было исследовано серебро марки Сr99,99 с химическим составом в соответствии с ГОСТ 6836-2002.

Для изучения механических свойств было привлечено производственное оборудование АО «Екатеринбургский завод ОЦМ» и исследовательское оборудование лаборатории физико-механических испытаний этого предприятия.

Применили методику, изложенную в работах [1,2]. Исследование разделено на два этапа. На первом этапе оценивали эффект упрочнения в диапазоне малых деформаций серебра марки Сr99,99, для этого использовали проволоку диаметром 1,20 мм, из которой нарезали образцы рабочей длиной 100 мм. Образцы отжигали в воздушной среде в течение 20 мин при температуре 400 °С.

На втором этапе отбирали образцы проволоки по переходам волочения и измеряли условный предел текучести без проведения операции отжига. Это позволило оценить эффект упрочнения в диапазоне больших деформаций.

Диаграмма условных напряжений представлена на рис. 1а.

В дальнейшем исключали из рассмотрения участок неоднородной деформации (относительное удлинение более 36 %), участок упругого

нагружения, а напряжения приводили к истинным значениям. В результате получили кривую упрочнения чистого серебра (99,99%) при малых деформациях (рис. 1б), из которого видно, что временное сопротивление серебра составило 270 МПа, что не ниже требуемого по ГОСТ 7222-2014.

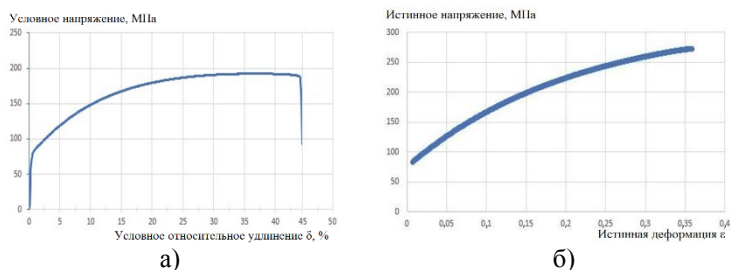


Рис. 1. Диаграммы: а) условных напряжений; б) истинных напряжений

В опытах методом волочения ступенчато уменьшали диаметр проволоки с отбором образцов при достижении диаметров 1,20-1,09-0,98-0,91-0,83-0,76-0,71-0,67-0,61-0,56-0,53-0,50-0,46 мм. После пересчета по формулам [1] были получены следующие значения степени деформации: 0,192; 0,405; 0,553; 0,737; 0,914; 1,050; 1,166; 1,353; 1,524; 1,634; 1,751; 1,918.

Полученные значения сопротивления деформации  $\sigma_s$  аппроксимированы методом наименьших квадратов уравнениями регрессии вида

$$\sigma_s = 74 + 230\epsilon^{0,20}; \quad (1)$$

$$\sigma_s = 74 + 421\epsilon^{0,65}; \quad (2)$$

где первое слагаемое - условный предел текучести материала в отожженном состоянии (МПа).

Уравнение (1) справедливо для области больших пластических деформаций (0,25-1,92), а уравнение (2) – малых пластических деформаций (0-0,25). Наличие двух уравнений регрессии связано с тем, что при использовании общего уравнения регрессии для всего диапазона деформации возникает значительная ошибка расчета для диапазона малых деформаций.

Таким образом, получены зависимости сопротивления деформации чистого серебра (99,99%) при скорости деформации 0,00144–0,00180  $\text{с}^{-1}$  в диапазоне степеней деформации 0–1,92. Установлено, что метод растяжения образцов позволяет получить данные по сопротивлению деформации при достижении относительного удлинения не выше 36 %, что соответствует степени деформации 0,31. Метод определения сопротивления деформации измерением условного предела текучести позволил получить данные при увеличении этой величины более чем в 6 раз.

## Литература

1. Логинов Ю.Н., Фомин А.А. Сопротивление деформации платинового сплава ПлПдРдРу 81-15-3,5-0,5 // Цветные металлы. – 2015. – № 12. – С. 80–83.
2. Логинов Ю.Н., Первухин А.Е. Сопротивление деформации проволочных образцов из платинового сплава // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. – Т. 83. № 12. – С. 57–60.

УДК 539.4.014

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТРУБАХ ПОСЛЕ ВОЛОЧЕНИЯ

**Шимов Г.В.<sup>1\*</sup>, Серебряков Ан.В.<sup>2</sup>, Серебряков Ал.В.<sup>1</sup>, Кондратьев В.Е.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Уральский Федеральный Университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> ОАО «Первоуральский новотрубный завод»,  
Первоуральск, Россия  
\*g.v.shimov@urfu.ru

На уровень и распределение в стенке трубы остаточных напряжений оказывают влияние практически все технологические параметры, как деформирования, так и термической обработки. Кроме того, затруднен непосредственный замер величины этих напряжений из-за несовершенства измерительных способов [1]. Вместе с тем, для труб ответственного назначения, таких как, например трубы парогенераторов из нержавеющей коррозионностойких сталей класса AISI 321, 316, 304 необходимо знать полную картину распределения остаточных напряжений по стенке трубы. Было проведено компьютерное моделирование процесса безоправочного волочения трубы размером  $16 \times 1,5$  из стали 08X18H10T в DEFORM-2D. Сетка конечных элементов была подобрана таким образом, чтобы было удобно разбить стенку трубы на «слои» (рис. 1). Рассмотрим расчет остаточных напряжений в стенке трубы размером  $16 \times 1,5$  из стали 08X18H10T. Разобьем стенку трубы на  $n$  слоев.

После выхода трубы из волоки происходит упругое перераспределение напряжений и одновременно труба подвергается растяжению в упругой области с силой волочения, другими словами происходит деформационная разгрузка. Очевидно, что из-за градиента температуры и степени деформации по сечению трубы одни слои стенки трубы после выхода из волоки «укорачиваются», а другие – «удлиняются». При этом все слои связаны в одной упруго-пластической системе [2].

Общая формула для определения внеочаговой относительной деформации в стенке трубы вследствие деформационной разгрузки

$$e = \frac{\sum_{i=1}^{n'} \beta_i E_i F_i t_i - \sum_{j=1}^{n''} \sigma_{sj} F_j + P}{\sum_{i=1}^{n'} E_i F_i}, \quad (1)$$

где  $n'$  – количество слоев, в которых нет пластического течения,  $n''$  – количество слоев, в которых пластическое течение есть.

Относительная деформация стенки трубы вследствие температурной релаксации от начальной температуры  $t_n$  до температуры конца разгрузки  $t_k$

$$e_1 = \frac{-\sum_{i=1}^{n'} (\beta_{1i} t_{1i} - \beta_{2i} t_{2i}) E'_i F_i + \sum_{j=1}^{n''} \sigma'_{sj} F_j - P}{\sum_{i=1}^{n'} E'_i F_i}, \quad (2)$$

где  $(\beta_{1i} t_{1i} - \beta_{2i} t_{2i})$  – приращение температурного расширения в  $i$ -м слое.

В общем виде формула для определения упругих продольных напряжений в трубе вследствие деформационной разгрузки будет выглядеть так:

$$\sigma_i^H = (-\beta_i t_i + e) E_i, \quad \sigma_j^H = -\sigma_{sj}. \quad (3)$$

Напряжения в слоях вследствие температурной разгрузки будут вычисляться по формуле

$$\sigma_i^P = [-(\beta_{1i} t_{1i} - \beta_{2i} t_{2i}) + e_1] E'_i, \quad \sigma_j^P = -\sigma_{sj}. \quad (4)$$

Результирующее остаточное напряжение в слоях вычисляется алгебраическим сложением двух составляющих:

$$\sigma_i^O = \sigma_i^H + \sigma_i^P. \quad (5)$$

Результаты полного расчета поля остаточных напряжений в стенке трубы  $16 \times 1,5$  из стали 08X18H10T приведены на рис. 2.

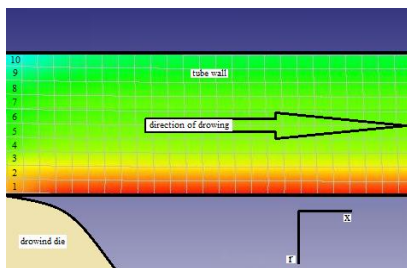


Рис. 1. Сетка конечных элементов в процессе моделирования

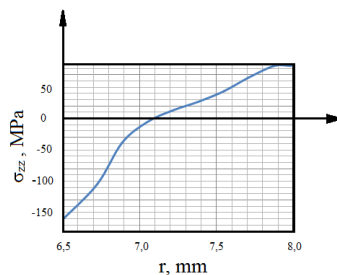


Рис. 2. Распределение остаточных напряжений  $\sigma_{zz}$  по стенке трубы

## **Выводы**

Описанная методика расчета позволяет, используя в качестве первичной информации результаты компьютерного моделирования, установить величину, а также распределение остаточных напряжений в стенке трубы. Методика позволяет проводить прогнозирование распределения остаточных напряжений по сечению стенки трубы, тем самым производить предварительную оценку технологии с точки зрения остаточных напряжений в готовой продукции. В дальнейшем расчет всех компонентов тензора остаточных напряжений можно провести по методике, описанной в работе [3].

## **Литература**

1. Sokolov I.A. Residual stresses and quality of metal products / I.A. Sokolov, V.I. Uralskii. - М.: Metallurgy, 1981. - 96 p.
2. Буркин С. П., Логинов Ю. Н., Тропотов А. В. и др. Анализ способов определения и устранения остаточных напряжений в трубных заготовках // В сб. научн. тр. «Достижения теории и практике трубного производства». Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2004. С. 87–97.
3. Shimov, G. V., Rapid Method for Determining the Distribution of Residual Stresses in Pipes. Materials Performance and Characterization. Vol. 7, No. 4, 2018. С. 526-535.

УДК 621.77.08, 620.19

## **ПРИМЕНЕНИЕ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДЛЯ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА ИЗ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ**

*Ширяев А.А., Раев И.К., Трофимов В.Н.  
Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет,  
Пермь, Россия  
alex.shiryaev.pstu@gmail.com*

Прокатка металла является заключительным этапом металлургического производства. Через прокатные цеха проходит около 92% выплавляющего металла. Листовая и рулонная полосовая сталь является исходной заготовкой для производства деталей методом холодной листовой штамповки [1].

На предприятии ОАО «Нытва» производится широкий ассортимент стальных и биметаллических лент. Для обеспечения качества деталей получаемых холодной листовой штамповкой из этих лент необходи-

мо обеспечить требуемые механические свойства, которые определяются условиями деформации при прокатке.

Для оперативного контроля механических свойств лент применяются различные методы контроля. При этом предпочтительнее использовать неразрушающие методы (НК) [2].

В работе рассмотрено применение НК, в частности, метода регистрации шумов Баркгаузена [3] для определения механических свойств металла ленты из сталей марок 08 и 35.

Образцы для проведения работы отбирались при каждом переходе от концевой части ленты. Общий вид образцов показан на рис. 1.

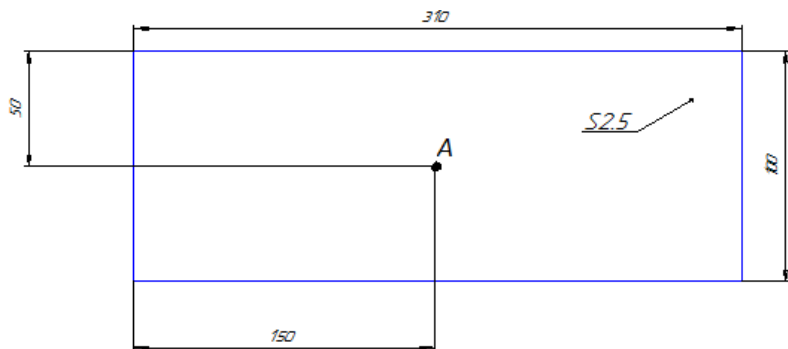


Рис. 1. Общий вид образца и положение контрольной точки: А – точка для измерения магнитошумового параметра (МП)

Холодная прокатка ленты ст. 08 и 35 осуществлялась по маршрутам

2,5– 1,9– 1,5 – 1,2 – 0,8; 3,0 – 2,7– 2,3– 2,0 – 1,7 – 1,5

Последовательность определения предела текучести:

1. Определяем МП с помощью прибора ROLLSCAN 200.
2. По значению МП вычисляем соответствующее значение  $\epsilon$ .
3. По вычисленному значению  $\epsilon$  с использованием формулы для стали 08  $\sigma_s = 30 + 7,7\epsilon^{0,48}$  (1) [4] определяем  $\sigma_s$ .

Учитывая тесную корреляционную связь МП и  $\sigma_s$ , используя уравнения (1) и для стали 35  $\sigma_s = 52,5 + 3,38\epsilon^{0,6}$  (2), получим зависимость от МП:

$$\text{для стали 08: } \sigma_s = 30 + 10,1(\text{МП} - 127,58)^{0,48}, \text{ кг/мм}^2. \quad (4)$$

$$\text{для стали 35: } \sigma_s = 52,5 + 3,76(\text{МП} - 57,3)^{0,6}, \text{ кг/мм}^2. \quad (5)$$

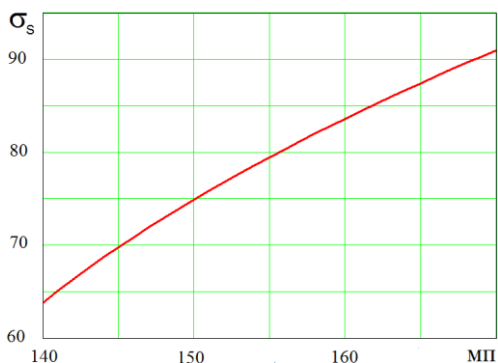


Рис. 2. Графическое представление формулы (4)

Используя подобный подход, можно определить зависимости типа (4) и (5) для других марок сталей.

#### Литература

1. Грудев А. П. Теория прокатки: Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1988, 240 с.
2. Неразрушающий контроль : справ. : в 8 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. 2-е изд., испр. М. : Машиностроение, 2008.
3. Инструкция по эксплуатации ROLLSCAN 200
4. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением: справ. 2-е изд. – М.: Металлургия, 1973.

УДК 621.771.06

### ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОТОКОВ В ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ «СТАН ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ»

*Ширяева Е.Н., Полякова М.А.*

*Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г.И. Носова,  
Магнитогорск, Россия  
e.shyraeva@mail.ru*

С возникновением интегративного направления формирования научных исследований появляется необходимость в создании системных исследований, необходимых для решения сложных комплексных проблем больших масштабов. Системность стоит понимать как рассмотрение отдельного объекта в виде элемента более сложной системы [1, 2]. В основании системного анализа технической системы «стан горячей прокат-

ки» лежит исследование объекта как единого множества составных частей в комплексе отношений и связей между ними. В результате дифференциации рассматриваемой системы появляется возможность определить некоторые компоненты (подсистемы): «нагрев сляба», «прокатка заготовки», «последедеформационное охлаждение», «смотка полосы», как представленные на схеме (рис. 1).

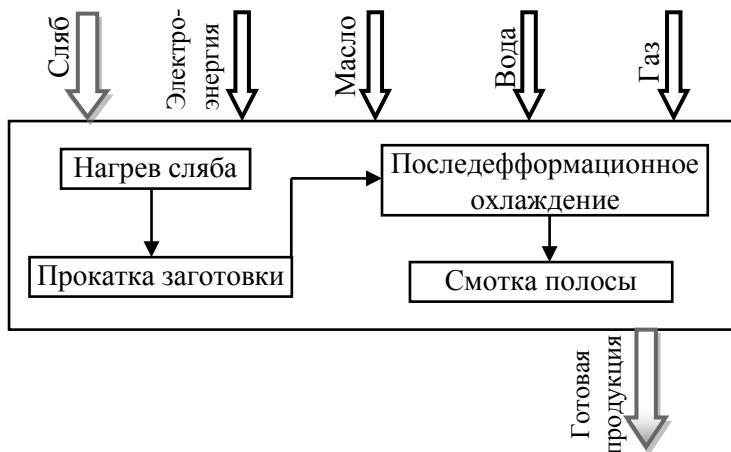


Рис. 1. Структурная схема технической системы «стан горячей прокатки»

Рассмотрение горячей прокатки как системы, состоящей из нескольких подсистем, помогает определить имеющиеся потоки материала, энергии и информации, проходящие через все подсистемы технического процесса поочередно и непрерывно, что, в свою очередь, помогает дать объективную оценку работоспособности листопркатного стана как технической системы в целом.

### Литература

1. Рубин Г.Ш., Данилова Ю.В., Полякова М.А. Системный анализ в стандартизации. Принцип системности в стандартизации // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Иркутск, 2017. № 1. С. 118-123.
2. Рубин Г.Ш., Данилова Ю.В., Полякова М.А. Системный анализ в стандартизации. Стандартизация как форма взаимодействия систем // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Иркутск, 2016. № 4. С. 100-105.
3. Голубчик Э.М. Адаптивное управление качеством металлопродукции // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1. С. 63-69.



## **РАСЧЕТ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПРЕССОВАНИИ И ВОЛОЧЕНИИ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ**

*Шишин Н.Н.<sup>1</sup>, Плаксин А.Д.<sup>1</sup>, Бабайлов Н.А.<sup>1,2</sup>*

*<sup>1</sup>Уральский федеральный университет, филиал УрФУ в г.Верхняя Салда,  
Верхняя Салда, Россия*

*<sup>2</sup>Институт машиноведения УрО РАН,  
Екатеринбург, Россия  
e-mail fupi\_vs@e1.ru*

Целью работы является разработка интерактивных программных модулей (так называемых «технологических калькуляторов») для расчета и анализа энергосиловых параметров технологических процессов обработки металлов давлением, в т.ч. силы, работы и мощности пластической деформации. Разработаны программные модули «Прессование металлоизделий» и «Волочение проволоки» из цветных металлов и сплавов (структурные схемы модулей приведены на рис.1), в т.ч. алюминиевых, медных и титановых сплавов. Работа выполнена в рамках курсовых научно-исследовательских работ (НИР) студентов-бакалавров филиала Уральского федерального университета в г.Верхняя Салда (обучающихся на кафедре «Металлургия титана»).

Данные модули помогут осуществить качественный анализ, например, различных процессов прессования для обеспечения энерго- и материалосбережения в процессах и технологиях, а также эффективности работы металлургических предприятий. Программные модули позволяют также проводить технологически обоснованный подбор размеров прессуемого слитка, подбор температурно-скоростных условий прессования, а также выполнить расчет на прочность основных элементов прессового инструмента и др.

Программные модули для расчета усилия деформирования заготовки представляют собой программные приложения для Windows XP, 7, 8 и 10. В качестве рабочего инструмента при разработке пользовательских программ выбран объектно-ориентированный язык программирования C Sharp (C#).

В ходе выполнения НИР получены следующие практические результаты с использованием разработанных программных модулей:

1. Определена средняя по сечению деформируемой заготовки температура в процессе прямого прессования труб и прутков [3]. Расчет выполнен на основе практических данных, полученных в рамках прохождения производственных практик студентов на предприятиях. В работе выполнена проверка адекватности построенной математической модели для определения средней температуры деформации. Например, пересчитаны

индикаторные диаграммы работы гидравлических прессов (зависимость усилия прессования от хода пресс-штемпеля) для алюминиевых труб из сплава АД-31 и титановых прутков из сплава ВТ-6;

2. Выполнена оценка силы деформации при многопроходном волочении биметаллической проволоки из платиносодержащих сплавов и др.

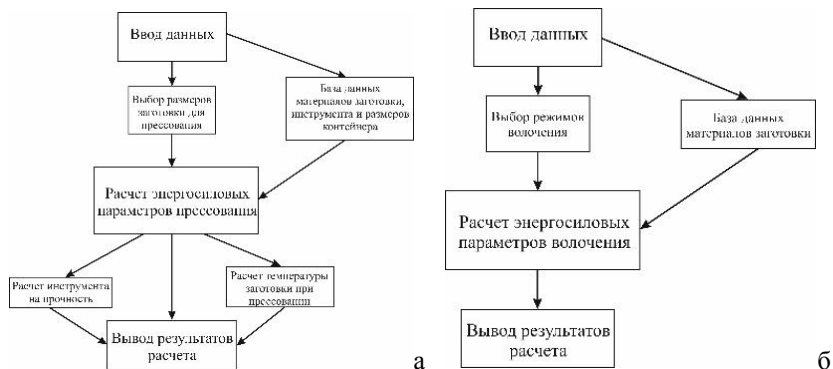


Рис.1. Структурная схема программных модулей «Прессование металлоизделий» (а) и «Волочение проволоки» б

Программные модули являются удобным, практичным программным средством для выполнения технологических расчетов и анализа исследуемых процессов обработки металлов давлением, в т.ч. при выполнении курсовых работ и выпускных квалификационных работ.

### Литература

1. Шишин Н.Н., Бабайлов Н.А. Интерактивный калькулятор для расчета энергосиловых параметров прессования // Сборник материалов XI международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций». – Екатеринбург, 2017. – С.73.
2. Шишин Н.Н., Бабайлов Н.А. Программа расчета параметров многопроходного волочения проволоки // Сборник материалов XII международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций». – Екатеринбург, 2018. – С.26.
3. Шишин Н.Н., Бабайлов Н.А. Изменение температуры заготовки при прессовании // «Актуальные проблемы развития технических наук». Сборник статей участников XX Областного конкурса научно-исследовательских работ «Научный Олимп» по направлению «Технические науки». – М.: Эдитус, 2018. – С. 48–53.

## ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ И ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ТРУБНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

*Шкуратов Е.А.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> *ОАО «РосНИТИ», Челябинск, Россия*

<sup>2</sup> *ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)», Челябинск, Россия*

*Shkuratov@rosniti.ru*

Повышение показателей качества готовой продукции, производимой в линии трубопрокатного агрегата является актуальной задачей особенно при прокатке труб, к которым предъявляются ужесточённые требования к геометрическим параметрам и качеству поверхности. В свою очередь, это оказывает значительное влияние к дальнейшему совершенствованию и изысканию новых путей развития в области техники и технологии трубного производства, которые, в совокупности, способствуют успешному развитию бизнеса.

Развитие трубопрокатного производства привело к широкому использованию непрерывных станов с удерживаемой оправкой и 3-валковыми калибрами для раскатки гильз [1]. Отличительной особенностью таких станов является высокий уровень автоматизации, наличие адаптивных систем и систем автоматического контроля процесса прокатки, в частности: ALS – система автоматической настройки частоты вращения валков раскатного стана; ATS – система автоматического регулирования толщины стенки раската; ISC – система компенсации динамической нагрузки при захвате; AFB – система адаптивной балансировка валков; АММС – система адаптивной компенсации упругой деформации рабочего инструмента; FTT – система гидроутонения концов труб; EDC – система автоматической настройки частоты вращения валков стана-извлекателя и многие другие [2, 3].

В свою очередь, наличие таких систем способствует формированию огромных массивов данных, регистрируемых в процессе прокатки труб в линии трубопрокатного агрегата. Тем не менее, в большинстве случаев, такие данные представляют собой "руду" которую ещё нужно обработать. Поэтому интеграция современных цифровых технологий в процесс создания продукции является неотъемлемым атрибутом современного предприятия, отвечающего новым вызовам и общепринятым мировым тенденциям глобального развития.

В рамках данной работы представлены основные результаты по разработке, адаптации и внедрению цифровых технологий в трубном производстве.

## Литература

1. Шкуратов, Е.А. Оптимизация процесса непрерывной раскатки гильз с целью повышения точности горячекатаных бесшовных труб [Текст] / дис. Е.А. Шкуратов канд. техн. наук: 05.16.05 «Обработка металлов давлением»: защищена 13.12.2017. – Ч., 2017. – 166 с.
2. Zhong, X. PQF & FQM three-roll mandrel mill / X. Zhong. – 2009(5)–p. 13–20.
3. Chen, B. Development and Comparative Analysis of 3-roll Mandrel Pipe Mills / B. Chen. – Steel Pipe, 2010(6), Vol. 39, No.3. – p. 60 – 62.

УДК 621.793

### ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

*Янсaitова М.И.<sup>1</sup>, Полякова М.А.<sup>2</sup>, Шехтман С.Р.<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «УГАТУ», Уфа, Россия*

*<sup>2</sup>Магнитогорский государственный*

*технический университет им. Г.И. Носова,*

*Магнитогорск, Россия*

*milyausha.yansaitova@mail.ru*

Нанесение вакуумных ионно-плазменных покрытий является одним из эффективных технологических процессов повышения эксплуатационных свойств изделий, эксплуатирующихся в сложных условиях. Качество получаемого изделия с покрытием зависит от многих параметров, включающих характеристики подложки и самого покрытия. В связи актуальной является задача по разработке подхода для оценки показателей качества вакуумных ионно-плазменных покрытий на основе комплексного анализа технологического обеспечения [1, 2]. Используя процессный анализ [3, 4], а также учитывая сложность процесса ионно-вакуумного нанесения покрытия, выбора показателей качества покрытий можно представить в виде следующих этапов: 1) функционально-целевой анализ системы «изделие - вакуумное ионно-плазменное покрытие»; 2) функционально-целевой анализ элемента «вакуумное ионно-плазменное покрытие» системы «изделие - вакуумное ионно-плазменное покрытие»; 3) определение функций технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия.

В результате проведенного функционально-целевого анализа системы «изделие - вакуумное ионно-плазменное покрытие» были установлены следующие характеристики данной системы: физико-химические

свойства покрытия, геометрические характеристики изделия, материалы изделия и покрытия, а также масса изделия с покрытием. Функциями в данной системе являются эксплуатационные характеристики изделия с покрытием: износостойкость, коррозионная стойкость, эрозионная стойкость, теплостойкость, термостойкость, прочность и трещиностойкость. Схема взаимосвязей включает технологический процесс нанесения покрытий, контроль покрытия и, как результат, формирование покрытия на поверхности изделия. Это позволяет установить зависимости между физико-механическими и геометрическими характеристиками, которые в свою очередь оказывают влияние на функции изделия в указанной системе.

Проведенный функционально-целевой анализ элемента «вакуумное ионно-плазменное покрытие» системы «изделие - вакуумное ионно-плазменное покрытие» позволил установить следующие стадии формирования покрытия – температура обрабатываемой поверхности, взаимодействие плазмы и рабочего газа с поверхностью изделия, осаждение ионов на поверхности изделия. Выходными параметрами в данной системе являются толщина, адгезия, микротвердость, состав, шероховатость, пористость покрытия. Анализ показал, что от осаждения ионов на поверхности изделия, т.е. от расположения детали в вакуумной камере и равномерности распределения толщины покрытия зависят все выходные характеристики покрытия. Кроме того, микротвердость получаемого покрытия зависит от температуры обрабатываемой поверхности, а шероховатость, в свою очередь, зависит от стадии взаимодействия плазмы и рабочего газа с поверхностью изделия.

При проведении анализа функций технологического процесса нанесения покрытия была установлена взаимосвязь между компонентами технологического процесса. Результатом указанного технологического процесса является вакуумное ионно-плазменное покрытие, которое зависит от технологических режимов обработки, оборудования, вида подготовки поверхности изделия, контроля качества покрытия. Построена структурно-функциональная схема ионно-плазменного процесса нанесения покрытия. Входными параметрами данного технологического процесса являются параметры поверхности, вид подготовки поверхности изделия и технологические режимы обработки, а выходными параметрами - показатели качества получаемых покрытий: толщина, адгезия, микротвердость, состав, шероховатость, пористость.

Разработанный подход является основой для разработки классификации показателей качества ионно-плазменных покрытий, исходя из их функций, а также покрытий позволяет разработать алгоритм выбора показателей качества вакуумных ионно-плазменных покрытий для их нормирования в нормативно-технической документации, что обеспечит достижение необходимых эксплуатационных свойств изделия с покрытием.

## Литература

1. Андреев, А.А. Износостойкие вакуумно-дуговые покрытия на основе титана в инструментальном производстве / А.А. Андреев, С.Н. Григорьев // СТИН. – 2006. - №2. – С.19-24.

2. Мухин, В.С. Поверхность технического объекта: физика, химия, механика, нанотехнология модифицирования / В.С. Мухин, С.Р. Шехтман // Вестник УГАТУ. – 2007. - №1 (19), т.9. – С. 84-91.

3 Рубин, Г. Ш. Развитие научных основ стандартизации / Г.Ш. Рубин, М.А. Полякова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2014. - № 1. - С. 97-102.

4. Фатхутдинов, Р.А. «Функции-процессы» в управлении конкурентоспособностью / Р.А. Фатхутдинов // Стандарты и качество. – 2008. - № 2. – С. 74-78.

## СОДЕРЖАНИЕ

### **Hailiang YU**

Enhanced mechanical properties of metal sheets by special rolling techniques.....3

### **Puneet Tandon**

Elevated temperature – incremental forming .....3

### **Irene Calliari, Claudio Gennari, Renato Gobbo, Enrico Simonetto**

Electrically enhanced plastic deformation of steels .....4

### **Korzniakova E.A., Sharapov E.A.**

Atomistic simulations of deformation mechanisms during metal forming .....7

### **Pesin A.**

Numerical modeling and development of new hybrid metal forming methods.....8

### **Gulin A.E., Polyakova M.A., Comazzetto A.**

The way to improve the complex of mechanical characteristics of drawn steel wire .....9

### **Grzegorz Smyk, Danuta Szeliga**

Implementation of the universal interface that allows the communication between many models to perform hot strip rolling schedules .....11

### **Irgebai G.A., Naizabekov A.B., Panin E.A.**

The study of the closure of internal defects under radial-shear rolling using fem simulation .....13

### **Комкова Д.А., Антонова О.В., Петрова В.Н., Волков А.Ю.**

Интенсивная пластическая деформация магния методами поперечного и обратного выдавливания при низких температурах .....15

### **Biryukova O.D., Pustovoytov D.O., Pesin A.M.**

Finite-element modeling of the strain state of aluminum alloys in process by the method of ARB .....17

### **Shayakhmetova E.R. Samigullina A.A., Zhilyaev A.P., Nazarov A.A.**

The change of the defective structure of annealed nickel under the action of ultrasonic treatment .....19

### **Pozhidaeva E.B., Chikishev D.N.**

Improving the rolling process of workpieces with internal defects .....22

### **Дурнопьянов А.В., Беспалов В.М., Сидельников С.Б., Ворошилов Д.С., Бернгардт В.А., Бермешев Т.В.<sup>1</sup>, Назаренко Д.В., Кулишова Е.А.**

Разработка режимов обработки и исследование механических свойств деформируемых полуфабрикатов из сплавов системы Al–Zr, изготовленных методом совмещенного литья прокатки-прессования .....23

<b>Селезнев В.С., Каманцев И.С., Салихьянов Д.Р.</b> Исследование послонных деформаций при прокатке пятислойного сталеалюминиевого композиционного материала «СТЗСП + АМГ3» .....25	25
<b>Voroshilov D.S., Sidelnikov S.B., Timofeev V.N., Motkov M.M., Bepalov V.M., Bermeshev T.V., Durnopyanov A.V., Nazarenko D.V.</b> Development of technology for obtaining wires of electrotechnical purpose from alloys of the Al-REM system received by using methods of combined processing .....29	29
<b>Panin E.A., Krivtsova O.N., Lezhnev S.N.</b> Study the influence of the pre-finish caliber form on the effectiveness of the grooves filling in the finishing pass during reinforcing steel rolling .....31	31
<b>Baryshnikov M.P., Ishimov A.S.</b> Research on dynamic recrystallization softening during a hot upsetting .....33	33
<b>Antsupov A.V.(Jr.), Makarova P.V.</b> Broadband hot rolling mill back-up rolls failure multiparameter model and ways to increase their durability based on the kinetic approach to the material destruction .....34	34
<b>Ахмед Аль-Кхузаи, Широков В.В., Выдрин А.В.</b> Исследование процесса пластического сопротивления металла в широком диапазоне изменения температурного режима для трубной стали .....37	37
<b>Ахмеров Д.А.</b> Исследование формирования концевых участков при редуцировании труб.....38	38
<b>Больных М.В., Орлов Г.А., Больных К.В.</b> Повышение стойкости инструмента прошивного стана .....40	40
<b>Больных М.В., Орлов Г.А., Больных К.В.</b> Совершенствование технологии прокатки труб на ТПА-140 .....42	42
<b>Водопьянова О.В., Непряхин С.О.</b> Влияние натяжения на напряженно-деформированное состояние и запас ресурса пластичности при прокатке .....46	46
<b>Галимьянов И.К.</b> Влияние температуры в круглой заготовке на структуру и раскол мельющих шаров .....48	48



<b>Глебов Л.А., Радионова Л.В., Фаизов С.С.</b> Припой ПОИп-52: исследование процесса и разработка технологии мелкосерийного производства проволоки.....	54
<b>Грехов С.К., Логинов Ю.Н.</b> Влияние геометрии ячеистой структуры при неравноосном выполнении ячеек на свойства конечного изделия из титанового сплава.....	56
<b>Губанов С.А., Чикишев Д.Н.</b> Повышение пластических характеристик жести непрерывного отжига при производстве в условиях ПАО «ММК».....	58
<b>Ерёмин А.В., Логинов Ю.Н.</b> Оценка пластичности прямоугольной проволоки из электротехнической меди.....	60
<b>Ерпалов М.В., Сидякина Е.В.</b> Влияние характера упрочнения на течение металла при высадке концов труб.....	62
<b>Замараева Ю.В., Логинов Ю.Н.</b> Влияние толщины оболочки на результаты осесимметричной осадки магния в холодном состоянии .....	64
<b>Ивлева Т.С., Мыльников С.В., Грехов С.К., Салихьянов Д.Р.</b> Анализ разнотолщинности при штамповке отводов из нержавеющей стали 08X18H10T .....	66
<b>Ковин Д.С., Шимов Г.В., Савиных В.В.</b> Исследования причин появления поверхностных дефектов в металлопродукции, изготавливаемой методом непрерывного прессования CONFORM.....	69
<b>Кривцов А.И., Столяров Ф.А., Харитонов В.А.</b> Повышение эффективности производства стальных канатов на основе применения операции кругового калибрующего обжатия.....	71
<b>Куркин А.А., Столяров Ф.А.</b> Исследование причин уширения заготовки гайки М16 увеличенной высоты при прошивке центрального отверстия .....	72
<b>Лицин К.В., Макаров Я.В.</b> Проектирование электропривода машины газовой резки в условиях прокатного цеха АО "Уральская сталь" .....	74
<b>Ефимова Ю.Ю., Лопатина Е.В., Барышникова А.М.</b> Методика электролитического полирования образцов для EBSD-анализа .....	76

<b>Мыльников С.В., Исхаков Р.Ф.</b> Компьютерное моделирование процесса правки рельсовой накладки в сортоправильной машине .....	78
<b>Водопьянова О.В., Непряхин С.О.</b> Анализ влияния рассогласования скоростей непрерывной прокатки на формоизменение металла .....	81
<b>Орлов А.Г., Логинов Ю.Н.</b> Моделирование изменения разностенности при редуцировании труб .....	83
<b>Павлов Д.А., Ерпалов М.В., Владимиров А.В.</b> Исследование влияния скоростных условий процесса продольной прокатки на разностенность труб .....	85
<b>Тет Паинг, Чжо Зяяр</b> Способ повышения прочности сталей .....	87
<b>Панин Е.А., Кривцова О.Н., Лежнев С.Н.</b> Изучение влияния формы предчистового калибра на эффективность заполнения канавок в чистовом калибре при прокатке арматурной стали .....	89
<b>Первухин А.Е., Логинов Ю.Н.</b> Оценка состояния поверхности проволоки, полученной полунепрерывным вытягиванием из расплава серебра .....	91
<b>Первухина Д.Н., Логинов Ю.Н., Бабайлов Н.А.</b> Определение прочности на сжатие брикетов из сечки алюминиевых проводов .....	93
<b>Пилипенко С.В.</b> Исследование влияния параметров процесса хпт на распределение обжатия толщины стенки трубы между прямым и обратным ходами клетки .....	95
<b>Постыляков А.Ю., Шварц Д.Л., Михайленко А.М.</b> Экспериментально-теоретическое исследование свободного уширения титанового сплава ВТ6 .....	97
<b>Пузанов М.П., Логинов Ю.Н.</b> Моделирование плоской прокатки при использовании условия пластичности Хилла .....	99
<b>Салько О.Ю., Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н., Родченков М.Н.</b> Рециклинг металлолома черных металлов на стане радиально-сдвиговой прокатки .....	102

<b>Анцупов А.В.(мл.), Смолкин Д.А., Макарова П.В.</b> Разработка комплексной модели отказов шарниров универсальных шпинделей и способов повышения их долговечности на основе кинетического подхода к разрушению материалов .....	104
<b>Соболев Д.О., Логинов Ю.Н.</b> Мониторинг работы растяжной машины для правки полос из алюминиевых сплавов .....	106
<b>Толкушкин А.О., Панин Е.А., Лежнев С.Н.</b> Использование программы Simufact Forming для создания модели профилегибочного стана .....	108
<b>Устинова Е.И., Шварц Д.Л., Михайленко А.М.</b> Разработка блок-схемы концепции двухэтапной оптимизации калибровки валков для прокатки швеллеров .....	110
<b>Хаматов Д.Д., Логинов Ю.Н.</b> Сопротивление деформации чистого серебра (99,99%) при больших пластических деформациях.....	113
<b>Шимов Г.В., Серебряков Ан.В., Серебряков Ал.В., Кондратьев В.Е.</b> Прогнозирование остаточных напряжений в трубах после волочения .....	115
<b>Ширяев А.А., Раев И.К., Трофимов В.Н.</b> Применение неразрушающих методов контроля механических свойств для листового проката из углеродистых сталей.....	117
<b>Ширяева Е.Н., Полякова М.А.</b> Особенности взаимодействия потоков в технической системе «стан горячей прокатки» .....	119
<b>Шишин Н.Н., Плаксин А.Д., Бабайлов Н.А.</b> Расчет энергосиловых параметров при прессовании и волочении металлоизделий.....	121
<b>Шкуратов Е.А.</b> Основные подходы и опыт применения цифровых технологий в трубном производстве .....	123
<b>Янсаитова М.И., Полякова М.А., Шехтман С.Р.</b> Подход к оценке показателей качества металлоизделий на основе комплексного анализа технологического обеспечения .....	124

Научное издание

## **MAGNITOGORSK ROLLING PRACTICE 2019**

Материалы IV международной  
молодежной научно-практической конференции

Под редакцией А.Г. Корчунова

Издается полностью в авторской редакции



Издательский центр ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»  
455000, Магнитогорск, пр. Ленина, 38  
Участок оперативной полиграфии ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»