

¹И.Е. Волокитина*, ²А.В. Волокитин, ²Е.А. Панин, ³Г.Ж. Молдабаева,
¹О.Ю. Салько, ³Е.И. Кульдеев

¹Рудненский индустриальный институт, Рудный, Казахстан

²Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

³Казахский Национальный Исследовательский Технический

Университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан

*e-mail: irinka.vav@mail.ru

СРАВНЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЕМЕДНОЙ И СТАЛЕАЛЮМИНЕВОЙ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОВОЛОК

Аннотация. В статье были изучены модели сталемедной и сталеалюминовой биметаллических проволок, полученные в ходе компьютерного моделирования в программе Deform. Рассмотрены основные параметры напряженно состояния: эквивалентное напряжение и среднее гидростатическое давление. При рассмотрении эквивалентного напряжения установлено, что в модели с алюминиевой оболочкой наблюдается достаточно однородное распределение напряжения по всем слоям; в модели с медной оболочкой за счет интенсификации обжатия стального сердечника распределение напряжений в обоих слоях крайне неравномерное – в оболочке уровень напряжений резко снижается в направлении от наружных слоев к внутренним. При рассмотрении среднего гидростатического давления установлено, что при изменении алюминиевой оболочки на медную, в обоих слоях гидростатическое давление возрастает по модулю, что является следствием повышения общего уровня сопротивления деформации.

Ключевые слова: моделирование, напряженное состояние, РКУП волочение.

Наиболее подходящий способ, на основе которого возможно разработать пригодную к промышленной конвертации технологию получения биметаллической проволоки и прутка с повышенными механическими свойствами является РКУП-волочение. На сегодняшний день было проведено много исследований взаимосвязи структура-свойства для однородной медной или стальной проволоки этим методом, который доказал свою эффективность [1-8].

Одним из наиболее эффективных методов теоретического анализа любого технологического процесса в настоящее время является компьютерное моделирование с помощью метода конечных элементов [9-15]. У данного способа исследования есть несколько неоспоримых преимуществ:

- возможность визуализации изучаемого процесса, даже внутри заготовки или инструмента, что является невозможным в реальных условиях;
- комплексный анализ сразу нескольких параметров в любой точке исследуемого объекта, что при традиционных способах также часто бывает невозможным, например, отсутствии необходимых эмпирических уравнений;
- возможность оптимизации процесса путем варьирования значений определенных геометрических или технологических параметров.

Все эти преимущества сделали МКЭ-моделирование достаточно распространенным способом теоретического изучения. Если рассматривать МКЭ-моделирование с позиции обработки давлением, то здесь лидирующую позицию занимает программа Deform, которая позволяет смоделировать почти любой процесс деформирования.

В ходе компьютерного моделирования в программе Deform были получены корректные модели совмещенного процесса «прессование-волочение» для деформирования биметаллической проволоки. В качестве исходной заготовки использовалась биметаллическая проволока с соединениями типа «сталь-алюминий» и «сталь-медь» диаметром 10 мм, причем диаметр стального сердечника был равен 8 мм. Материалом сердечника была выбрана сталь

AISI-1010 (аналог стали 10). В качестве материала оболочки был выбран алюминиевый сплав 1100 и медный сплав CDA 110 (техническая медь).

При изучении эквивалентного напряжения на стадии РКУ-прессования было установлено, что при прохождении через каналы РКУ-матрицы, в оболочке и сердечнике развиваются разные уровни напряжения, охватывающие всю зону стыка каналов. В алюминиевой оболочке среднее значение эквивалентного напряжения равно $110 \div 120$ МПа (рисунок 1а). В стальном сердечнике, за счет одновременного действия тянущей скорости у переднего конца, вызывающей растяжение, и подпирающей скорости у заднего конца, вызывающей сжатие, возникает знакопеременное распределение напряжения. При прохождении промежуточного канала наибольшая величина напряжения возникает в нижней части сердечника, достигая 480 МПа. Но, в выходном канале, когда влияние задней скорости ослабевает, максимальные напряжения реализуются уже на верхней части сердечника (490 МПа), в целом уравнивая весь очаг деформации.

При волочении (рисунок 1б) очаг деформации является полностью симметричным. В оболочке среднее значение эквивалентного напряжения равно 100 МПа. Уровень средних напряжений в сердечнике значительно снижается до 280 МПа.

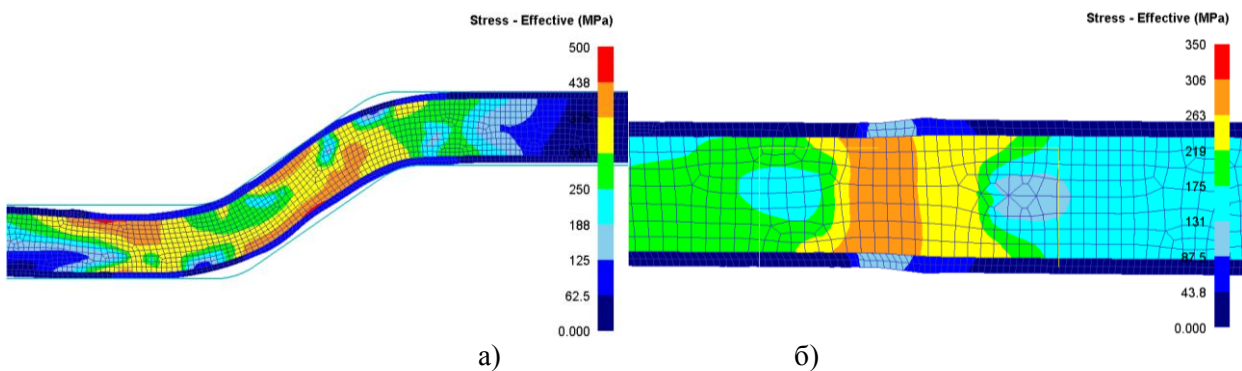


Рисунок 1. Эквивалентное напряжение в модели с алюминиевой оболочкой
а – стадия РКУП; б – стадия волочения

В модели с медной оболочкой было отмечено, на стадии РКУ-прессования в стальном сердечнике распределение эквивалентного напряжения и его численные значения являются идентичными модели с оболочкой из алюминия. В медной оболочке среднее значение эквивалентного напряжения равно $310 \div 330$ МПа (рисунок 2а).

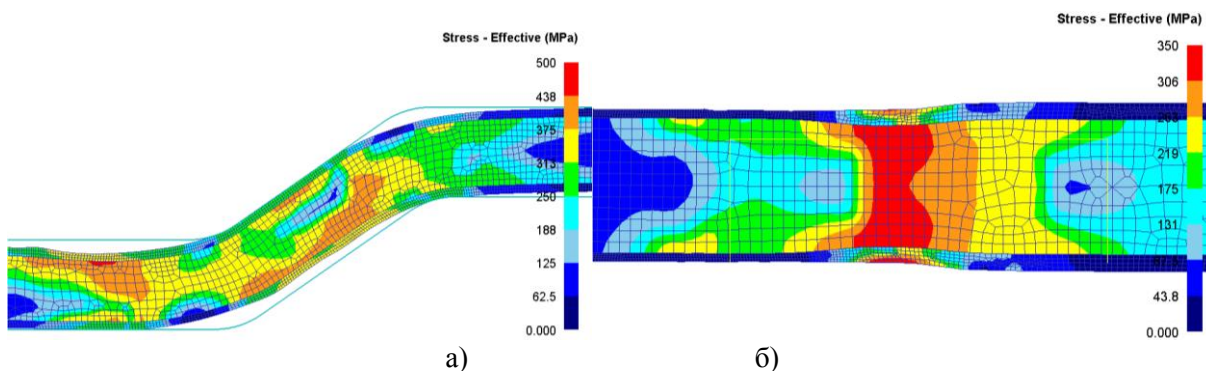


Рисунок 2. Эквивалентное напряжение в модели с медной оболочкой
а – стадия РКУП; б – стадия волочения

На стадии волочения (рисунок 2б) очаг деформации также становится симметричным. В медной оболочке, за счет более высокого уровня сопротивления деформации материала,

возникает крайне неоднородное распределение напряжений по толщине (в отличие от алюминиевой, где распределение напряжений достаточно однородно). В непосредственной зоне контакта оболочки с волокой величина напряжения составляет 300-310 МПа, постепенно снижаясь до 220 МПа в зоне контакта с сердечником. В стальном сердечнике характер распределения напряжений остается аналогичным ранее рассмотренному (рисунок 1б). Однако, за счет более сильного обжатия уровень эквивалентного напряжения здесь возрастает до 350 МПа.

Наибольший интерес представляет именно стадия волочения, поскольку здесь формируется конечная толщина проволоки, а также финальное распределение толщин оболочки и сердечника. На рисунке 3 представлено распределение эквивалентного напряжения по всему поперечному сечению заготовки.

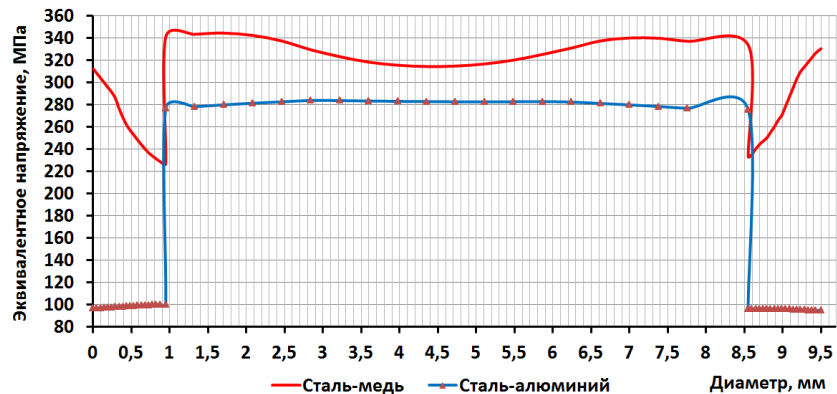


Рисунок 3. Распределение эквивалентного напряжения по сечению

Отчетливо видно, что в модели с алюминиевой оболочкой распределение эквивалентного напряжения по сечению полностью однородно, на что указывает горизонтальный характер кривой в обоих слоях. В модели с медной оболочкой распределение эквивалентного напряжения в сердечнике имеет небольшую неоднородность - величина напряжения меняется от 350 МПа на поверхности сердечника до 315 МПа в центре. В оболочке распределение эквивалентного напряжения крайне неравномерное – разница напряжений по толщине оболочки достигает 90-110 МПа.

При рассмотрении среднего гидростатического давления на стадии РКУ-прессования было выявлено, что характер распределения данного параметра аналогичен распределению эквивалентного напряжения. В алюминиевой оболочке (рис. 4а) на участках, где контакт с инструментом отсутствует, возникают растягивающие напряжения 100÷110 МПа.

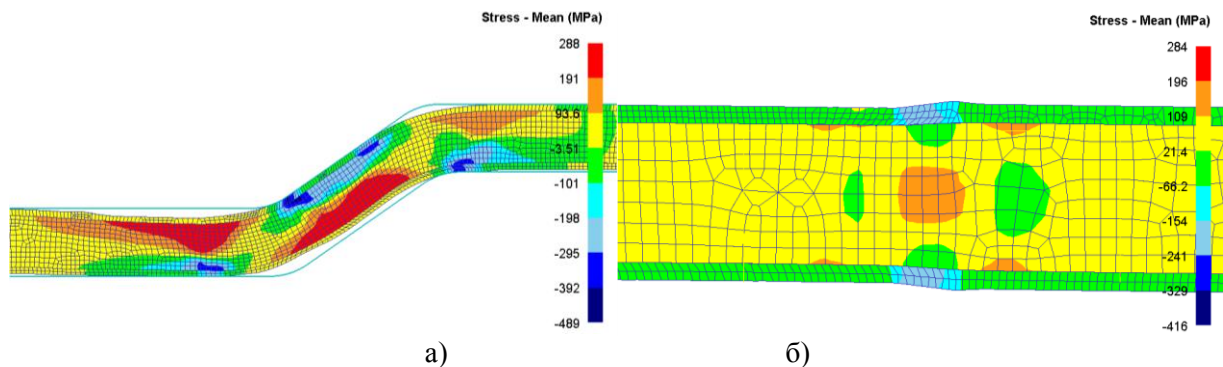


Рисунок 4. Среднее гидростатическое давление в модели с алюминиевой оболочкой
а – стадия РКУП; б – стадия волочения

На прямолинейных участках, где имеется контакт с матрицей, оболочка испытывает противодействие от матрицы, что приводит к созданию сжимающих напряжений $-80 \div -90$ МПа. Максимальный уровень противодействия создается непосредственно на стыках каналов – здесь величина сжимающих напряжений достигает значения -350 МПа.

В стальном сердечнике распределение растягивающих и сжимающих напряжений можно назвать идентичным распределению в оболочке. На верхних участках входного и выходного каналов, а также на нижнем участке промежуточного канала возникают растягивающие напряжения, значение которых равно около $230 \div 240$ МПа. На противоположных участках во всех каналах реализуются сжимающие напряжения, достигающие -360 МПа.

При волочении (рисунок 4б) очаг деформации, как и при рассмотрении эквивалентного напряжения, является полностью симметричным. В оболочке возникают сжимающие напряжения примерно -180 МПа. В центре сердечника создаются растягивающие напряжения на уровне 160 МПа. Снижение этих напряжений наблюдается непосредственно в зонах контакта с оболочкой, где их величина снижается до -40 МПа.

В модели с медной оболочкой на стадии РКУ-прессования было выявлено, что характер распределения данного параметра в стальном сердечнике полностью аналогично распределению в модели с оболочкой из алюминия. В медной оболочке (рисунок 5а) на участках, где контакт с инструментом отсутствует, возникают растягивающие напряжения $150 \div 160$ МПа. На прямолинейных участках, где имеется контакт с матрицей, оболочка испытывает противодействие от матрицы, что приводит к созданию сжимающих напряжений $-380 \div -400$ МПа. Максимальный уровень противодействия создается непосредственно на стыках каналов – здесь величина сжимающих напряжений достигает значения -490 МПа.

При волочении (рисунок 5б) в оболочке возникают сжимающие напряжения примерно -240 МПа. В центре сердечника создаются растягивающие напряжения на уровне 200 МПа. Снижение этих напряжений наблюдается непосредственно в зонах контакта с оболочкой, где их величина снижается до -80 МПа.

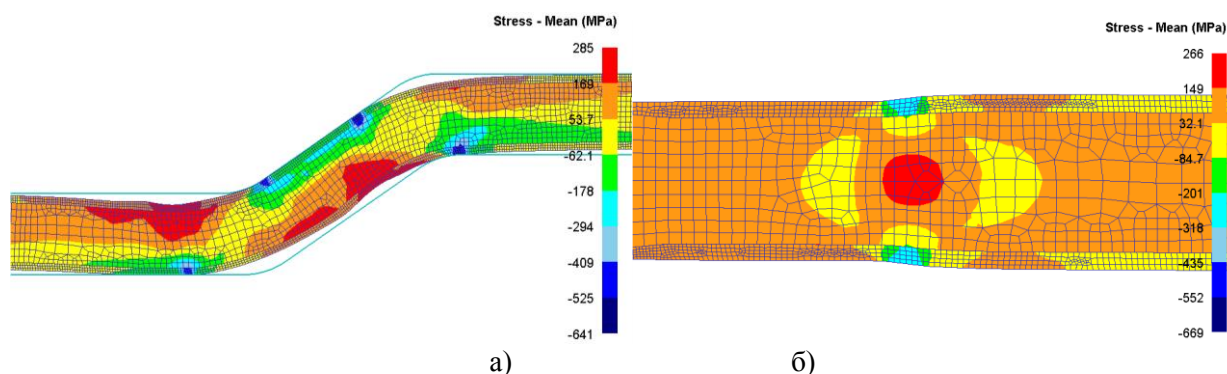


Рисунок 5. Среднее гидростатическое давление в модели с медной оболочкой
а – стадия РКУП; б – стадия волочения

На рисунке 6 представлено распределение среднего гидростатического давления по сечению заготовки.

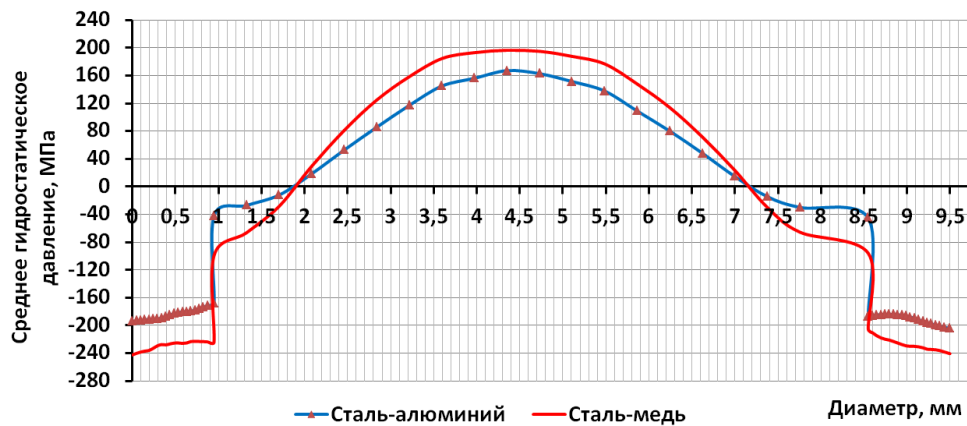


Рисунок 6. Распределение среднего гидростатического давления по сечению

Выводы: при изучении моделей, полученных в ходе компьютерного моделирования в программе Deform, были рассмотрены основные параметры напряженно-деформированного состояния: эквивалентное напряжение и среднее гидростатическое давление. При рассмотрении эквивалентного напряжения было отмечено, что в модели с алюминиевой оболочкой наблюдается достаточно однородное распределение напряжений по всем слоям; в модели с медной оболочкой за счет интенсификации обжатия стального сердечника распределение напряжений в обоих слоях крайне неравномерное – в оболочке уровень напряжений резко снижается в направлении от наружных слоев к внутренним; в сердечнике характер распределения напряжений имеет «градиентный» характер, с ярко выраженной чашевидной формой графика. При рассмотрении среднего гидростатического давления было отмечено, что при изменении алюминиевой оболочки на медную, в обоих слоях гидростатическое давление возрастает по модулю, что является следствием повышения общего уровня сопротивления деформации.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Naizabekov A., Lezhnev, S., Volokitin A., Panin E., Knapinski M. Development and research of combined process of "equal channel angular pressing – drawing" // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 52. 2017. P. 172-179.
- [2] A. Naizabekov, I. Volokitina, E. Panin, A. Volokitin, S. Lezhnev, T. Garstka, M. Knapinski, M. Latypova, D. Zhumagaliev. Computer simulation of combined deformation method "ECA-pressing – drawing" // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 55. 2020. P. 499-506.
- [3] Naizabekov A., Volokitina I., Volokitin A., Panin E. Structure and mechanical properties of steel in the process "pressing-drawing" // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2019. Vol. 28. P. 1762-1771.
- [4] Volokitina I.E., Volokitin A.V., Naizabekov A.B., Lezhnev S.N. Change in structure and mechanical properties of grade A0 aluminum during implementation of a combined method of ECAE–drawing deformation // *Metallurgist*. 2020. Vol. 63. P. 978–983.
- [5] Volokitina I.E., Volokitin A.V. Evolution of the Microstructure and Mechanical Properties of Copper during the Pressing–Drawing Process // *Physics of Metals and Metallography*. 2018. Vol. 119. P. 917-921.
- [6] Lezhnev S.N., Volokitina I.E., Volokitin A.V. Evolution of Microstructure and Mechanical Properties of Steel during Pressing–Drawing // *Physics of Metals and Metallography*. 2017. Vol. 118. P. 1167-1170.
- [7] С.Н. Лежнев, Г.Г. Курапов, И.Е. Волокитина, Е.П. Орлова. Влияние совмещенного процесса «прессование-волочение» на свойства деформируемой медной проволоки // *Вестник КазНТУ*. Алматы 2017. №4 (122), 79-84.
- [8] Волокитин А.В., Чукин М.В. Моделирование совмещенного процесса «прессование-волочение» с применением равноканальной ступенчатой матрицей. *Республиканский научный журнал // Технология производства металлов и вторичных материалов*. Темиртау, 2013, №2. – С. 128-135.

[9] Cerri E., De Marco P.P., Leo P. FEM and metallurgical analysis of modified 6082 aluminium alloys processed by multipass ECAP: Influence of material properties and different process settings on induced plastic strain // *Journal of Materials Processing Technology*. 2009, Vol. 209, Iss. 3, pp. 1550-1564.

[10] Djavanroodi F., Ebrahimi M. Effect of die channel angle, friction and back pressure in the equal channel angular pressing using 3D finite element simulation // *Materials Science and Engineering A*. 2010, Vol. 527, Iss. 4-5, pp. 1230-1235.

[11] Naizabekov A., Lezhnev S., Arbutz A., Volokitina I., Panin E., Volokitin A. Structure and Mechanical Properties of AISI1045 in the Helical Rolling–Pressing Process // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2020, Vol. 29, Iss. 1, pp. 315-329.

[12] Rosochowski A., Olejnik L. Finite element simulation of severe plastic deformation processes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L - Journal of Materials - Design And Applications*. 2007, Vol. 221, Iss. L4, pp. 187-196.

[13] Milind T.R., Date P.P. Analytical and finite element modeling of strain generated in equal channel angular extrusion // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2012, Vol. 56, Iss. 1, pp. 26-34.

[14] Abd El Aal, Mohamed Ibrahim. 3D FEM simulations and experimental validation of plastic deformation of pure aluminum deformed by ECAP and combination of ECAP and direct extrusion // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2017, Vol. 27, Iss. 6, pp. 1338-1352.

[15] Olejnik L., Rosochowski A. Methods of fabricating metals for nano-technology // *Bulletin of the Polish Academy of Sciences - Technical sciences*. - 2005. - Vol. 53, No. 4. - P. 413-423.

REFERENCES

[1] Naizabekov A., Lezhnev, S., Volokitin A., Panin E., Knapinski M. Development and research of combined process of "equal channel angular pressing – drawing" // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 52. 2017. P. 172-179.

[2] A. Naizabekov, I. Volokitina, E. Panin, A. Volokitin, S. Lezhnev, T. Garstka, M. Knapinski, M. Latypova, D. Zhumagaliev. Computer simulation of combined deformation method “ECA-pressing – drawing” // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 55. 2020. P. 499-506.

[3] Naizabekov A., Volokitina I., Volokitin A., Panin E. Structure and mechanical properties of steel in the process "pressing-drawing" // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2019. Vol. 28. P. 1762-1771.

[4] Volokitina I.E., Volokitin A.V., Naizabekov A.B., Lezhnev S.N. Change in structure and mechanical properties of grade A0 aluminum during implementation of a combined method of ECAE–drawing deformation // *Metallurgist*. 2020. Vol. 63. P. 978–983.

[5] Volokitina I.E., Volokitin A.V. Evolution of the Microstructure and Mechanical Properties of Copper during the Pressing–Drawing Process // *Physics of Metals and Metallography*. 2018. Vol. 119. P. 917-921.

[6] Lezhnev S.N., Volokitina I.E., Volokitin A.V. Evolution of Microstructure and Mechanical Properties of Steel during Pressing–Drawing // *Physics of Metals and Metallography*. 2017. Vol. 118. P. 1167-1170.

[7] S.N. Lezhnev, G.G. Kurapov, I.E. Volokitina, E.P. Orlova. Vliyanie sovmeshhennogo processa «pressovanie-volochzenie» na svojstva deformiruemoj mednoj provoloki // *Vestnik KazNITU*. Almaty 2017. №4 (122), 79-84.

[8] Volokitin A.V., Chukin M.V. Modelirovanie sovmeshhennogo processa «pressovanie-volochzenie» s primeneniem ravnokanal'noj stupenchatoj matricej. *Respublikanskij nauchnyj zhurnal // Tehnologija proizvodstva metallov i vtorichnyh materialov*. Temirtau, 2013, №2. – S. 128-135.

[9] Cerri E., De Marco P.P., Leo P. FEM and metallurgical analysis of modified 6082 aluminium alloys processed by multipass ECAP: Influence of material properties and different process settings on induced plastic strain // *Journal of Materials Processing Technology*. 2009, Vol. 209, Iss. 3, pp. 1550-1564.

[10] Djavanroodi F., Ebrahimi M. Effect of die channel angle, friction and back pressure in the equal channel angular pressing using 3D finite element simulation // *Materials Science and Engineering A*. 2010, Vol. 527, Iss. 4-5, pp. 1230-1235.

[11] Naizabekov A., Lezhnev S., Arbutz A., Volokitina I., Panin E., Volokitin A. Structure and Mechanical Properties of AISI1045 in the Helical Rolling–Pressing Process // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2020, Vol. 29, Iss. 1, pp. 315-329.

[12] Rosochowski A., Olejnik L. Finite element simulation of severe plastic deformation processes. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L - Journal of Materials - Design And Applications. 2007, Vol. 221, Iss. L4, pp. 187-196.

[13] Milind T.R., Date P.P. Analytical and finite element modeling of strain generated in equal channel angular extrusion // International Journal of Mechanical Sciences. 2012, Vol. 56, Iss. 1, pp. 26-34.

[14] Abd El Aal, Mohamed Ibrahim. 3D FEM simulations and experimental validation of plastic deformation of pure aluminum deformed by ECAP and combination of ECAP and direct extrusion // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2017, Vol. 27, Iss. 6, pp. 1338-1352.

[15] Olejnik L., Rosochowski A. Methods of fabricating metals for nano-technology // Bulletin of the Polish Academy of Sciences - Technical sciences. - 2005. - Vol. 53, No. 4. - P. 413-423.

¹**И.Е. Волокитина***, ²**А.В. Волокитин**, ²**Е. А. Панин**, ³**Г.Ж. Молдабаева**, ¹**О. Ю. Салко**, ³**Е.И. Кульдеев**

¹Rudny industrial institute, Rudny, Kazakhstan

²Karaganda industrial university, Temirtau, Kazakhstan

³ Kazakh national research technical university named after K.I. Satpayev, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: irinka.vav@mail.ru

COMPARISON OF THE STRESS STATE OF STEEL-COPPER AND STEEL-ALUMINUM BIMETALLIC WIRES

Abstract. In this article, the models of steel-copper and steel-aluminum bimetallic wires obtained in the course of computer simulation in Deform program were studied, the main parameters of the stress state (equivalent stress and average hydrostatic pressure) were considered. When considering the equivalent stress, it is found that in the model with an aluminum shell, a fairly uniform distribution of stress is observed over all layers; in the model with a copper shell, due to the intensification of compression of the steel core, the stress distribution in both layers is extremely uneven – in the shell, the stress level decreases sharply in the direction from the outer layers to the inner ones. When considering the average hydrostatic pressure, it is found that when the aluminum shell changes to copper, the hydrostatic pressure in both layers increases in absolute values, which is a consequence of an increase in the overall level of deformation resistance.

Keywords: simulation, stress state, ECAP-drawing.

¹**И.Е. Волокитина***, ²**А.В. Волокитин**, ²**Е.А. Панин**, ³**Г.Ж. Молдабаева**,

¹**О.Ю. Салко**, ³**Е.И. Кульдеев**

¹Рудный индустриалдық институты, Рудный, Қазақстан

²Қарағанды индустриалдық университеті, Теміртау, Қазақстан

³Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті,

Алматы, Қазақстан

*e-mail: irinka.vav@mail.ru

БОЛАТ-МЫС ЖӘНЕ БОЛАТ-АЛЮМИНИЙ БИМЕТАЛЛ СЫМДАРЫНЫҢ КЕРНЕУЛІК КҮЙІН САЛЫСТЫРУ

Андатпа. Мақалада Deform бағдарламасында компьютерлік модельдеу кезінде алынған болат-мыс және болат-алюминий биметалл сымдарының модельдері зерттелді. Кернеулік күйдің негізгі параметрлері қарастырылды: балама кернеу және орташа гидростатикалық қысым. Балама кернеуді қарастырғанда, алюминий модельде барлық қабат бойымен біртекті кернеудің таралуы байқалды; ал мыс модельде болат өзекшені қысуды қарқындету есебінен кернеудің таралуы біртектісіз – қабатта кернеу деңгейі сырттан ішке қарай күрт төмендейді. Орта гидростатикалық қысымды қарастырғанда, алюминий қабат мыс қабатқа өзгергенде екі қабатта да гидростатикалық қысым модуль бойынша өседі, бұл деформация кедергісінің жоғарылау салдарынан болады.

Негізгі сөздер: модельдеу, кернеулік күй, ТКБП тарту.