

- penko M.A., Nyashin Yu.I., Rudakov R.N. // International Journal of Solids and Structures. 2003. Vol. 40. P. 3129-3136.
9. Об одном подходе к решению некоторых одномерных контактных задач / Осипенко М.А., Няшин Ю.И. // Известия Саратовского университета. Новая серия. 2011. Т. 11, сер. Математика. Механика. Информатика, вып. 1. С. 77-84.

10. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1988. 711 с.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

EQUAL-STRESS LEAF SPRINGS

**Nyashin Yury Ivanovich** – D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Theoretical Mechanics and Biomechanics Department, Perm National Research Polytechnic University, Russia. Phone: +7(342) 239 17 02. E-mail: nyashin@inbox.ru.

**Osipenko Mikhail Anatolyevich** – Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University, Russia. Phone: +7 (342) 239 17 02. E-mail: oma@theormech.pstu.ac.ru.

**Gitman Mikhail Borisovich** – D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Perm National Research Polytechnic University, Russia. Phone: +7 (342) 239 12 97. E-mail: tpv@matmod.pstu.ac.ru.

**Abstract.** A series of results concerning the finding of the parameters of the equal-stress leaf springs is presented. The nonlinear bending of the single-leaf spring of the variable profile is considered. It is established that the optimum profile for a strong bending is elliptic. The linear bending of a two-leaf spring with leaves of a variable profile is studied. It is proved that the equal-stress spring does not exist for different lengths of leaves, if the stresses sign is invariable along leaves. Such spring exists only for equal lengths of leaves. If the sign varies but the absolute value of stress is invariable, then the equal-stress spring exists when a shorter leaf is sufficiently long. Such spring contains the internal joint. The parameters of a partially equal-stress two-leaf spring with constant profiles of the leaves are found. The connection between these parameters and a solution of the problem of maximum stress minimization is established.

**Keywords:** leaf spring, linear and nonlinear bending, equal-stress spring, internal joint, stress minimization.

References

1. Parkhilovsky I.G. *Avtomobilnye listovye resory* [Automotive leaf springs]. Moscow: Mechanical Engineering, 1978. 227 p.
2. Ponomarev S.D. et al. *Raschyoty na prochnost v mashinostroenii* [Stress calculation in mechanical engineering]. Vol. 1. Moscow: Mechanical Engineering Publ., 1956. 884 p.
3. Osipenko M.A., Nyashin Y.I., Rudakov R.N., Ostanin A.V., Kuleshova E.N., Zhuravleva T.N. Mathematical modelling of the foot prosthesis elastic element under bending. *Russian Journal of Biomechanics*. 2001, vol. 5, no. 2, pp. 18–29.
4. Brynskikh S.I., Osipenko M.A., Nyashin Yu.I. Optimizatsiya dvukhlistovogo uprugogo elementa proteza stopy s ispolzovaniem lineinoi i nelineinoi teorii izgiba [The optimization of the two-leaf elastic element of the foot prosthesis under linear and non-linear bending theories]. *Rossiiskiy zhurnal biomekhaniki* [Russian Journal of Biomechanics]. 2003, vol. 7, no. 2, pp. 9–19.
5. Geil M.D., Parnianpour M., Berme N. Significance of nonsagittal power terms in analysis of a dynamic elastic response prosthetic foot. *Journal of Biomechanical Engineering*. October 1999, vol. 121, pp. 521–524.
6. Nyashin Yu.I., Osipenko M.A., Rudakov R.N. K teorii izgiba listovoy resory [On the theory of leaf spring bending]. *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Mechanics of Solids]. 2002, no. 6, pp. 134–143.
7. Osipenko M.A., Talantsev N.F. O svoistvakh koeffitsienta ispolzovaniya materiala listovoy resory [On the properties of the material utilization coefficient for a leaf spring]. *Izvestiya VUZov. Povolzsky region. Tekhnicheskie nauki* [News of Higher Educational Institutions. Volga Region. Technical Sciences]. 2009, no. 2(10), p. 134–144.
8. Osipenko M.A., Nyashin Yu.I., Rudakov R.N. A contact problem in the theory of leaf spring bending. *International Journal of Solids and Structures*, 2003, vol. 40, pp. 3129-3136.
9. Osipenko M.A., Nyashin Yu.I. Ob odnom podkhode k resheniyu nekotorykh odnomernykh kontaktnykh zadach [A certain approach to solving some one-dimensional contact problems]. *Izvesiya Saratovskogo Universiteta. Novaya seriya. Seriya Matematika. Mekhanika. Informatika*. [News of Saratov University. New Series. Series in Mathematics, Mechanics, Computer Science]. 2011, vol. 11, no. 1, pp. 77–84.
10. Rabotnov Yu.N. *Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela* [Mechanics of Deformable Solids]. Moscow: Science, 1988, 711 p.

УДК 621.778.011:001.891.57

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ В ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ С УЧЕТОМ НЕОДНОРОДНОСТИ СТРУКТУРЫ

Барышников М.П.<sup>1</sup>, Чукин М.В.<sup>1</sup>, Бойко А.Б.<sup>1</sup>, Дья Х.<sup>2</sup>, Назайбеков А.Б.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия

<sup>2</sup> Ченстоховский технологический университет, Польша

<sup>3</sup> Рудненский индустриальный институт, Казахстан

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования влияния неоднородности структурных составляющих на напряженно-деформированное состояние в процессах обработки давлением металлов и сплавов.

Выполнен обзор методов моделирования с выявлением их достоинств и недостатков. Представлен анализ микроструктуры катанки и определен тип неметаллических включений для конечно-элементного моделирования в программном комплексе. Методом конечных элементов выполнено моделирование процессов осадки биметаллической сталемедной катанки и волочения высокопрочной арматуры из стали марки 80P.

**Ключевые слова:** неоднородность структуры, микроструктура, неметаллические включения, метод конечных элементов.

### Введение

В условиях постоянной интенсификации производства очень важным является качество заготовки, полученной на каждом предшествующем этапе. Несоответствие механических свойств заготовки приводит к дополнительным экономическим издержкам, обусловленным простоем оборудования, отбраковкой заготовки с высокой добавленной стоимостью, а также повышению вероятности возникновения несчастных случаев с участием технологического персонала. Снижение вероятности получения несоответствующей продукции возможно использованием комплексного подхода, сочетающего исследование факторов, влияющих на снижение механических свойств, и анализ возможности их устранения. Развитие программных средств и совершенствование вычислительной техники предоставляет возможность проведения испытаний средствами компьютерного моделирования. При этом экспериментальная работа с промышленными и лабораторными установками необходима для подтверждения соответствия математической модели эмпирическим данным.

### Исследование механических характеристик среды

Исследование механических характеристик среды в большинстве случаев сводится к оценке прочности согласно известному напряженному состоянию [1–5]. Напряженное состояние в самом простом случае можно разделить на одноосное (линейное) и сложное. Сложное напряженное состояние в свою очередь принято разделять на плоское и объемное. При решении модели линейного напряженного состояния основной задачей является определение максимальных напряжений и деформаций в наиболее опасном сечении. Задача существенно усложняется при сложном напряженном состоянии. В этом случае определить максимальное главное напряжение для опасного сечения оказывается недостаточным, поскольку более важным оказывается не критическое значение какого-либо напряжения или значения деформации, а соотношения между ними. С целью определения наиболее опасного состояния в зависимости от объемного напряженно-деформированного состояния необходимо принять некоторый критерий, согласно которому можно определить преимущественное влияние какого-либо компонента НДС.

Введение критерия прочности позволяет перейти от сложного напряженного состояния к равноопасному, эквивалентному ему с точки зрения прочности материала. Для этой цели используют понятие эквивалентного напряжения – напряжение, под действием которого материал в условиях простого растяжения-сжатия оказывается в равноопасном состоянии с рассматриваемым напряженным состоянием.

Объектом исследования данной работы является процесс формоизменения заготовки под действием внешних сил. При внесении в объект исследования дискретности структуры, связанной с наличием в заготовке нескольких составляющих, возможны два подхода к описанию среды и последующему решению поставленной задачи. Первый подход предполагает описание всего объема заготовки как сплошной среды с равномерными свойствами. Чтобы учесть изменение механических свойств заготовки в результате влияния неравномерности структуры, при расчете НДС, в уравнение необходимо вносить поправочные коэффициенты. Для нахождения поправочных коэффициентов возможно применение коэффициентов, вычисленных теоретически, либо полученных эмпирическим путем. Данный подход позволяет упростить решение задачи, в том числе при помощи математического моделирования, однако указанные допущения не позволяют оценить распределение напряжений и деформаций в процессе формоизменения с достаточной точностью. Указанный недостаток можно избежать применением второго подхода к описанию среды, заключающийся в представлении объема заготовки как дискретной среды. В рамках данного подхода заготовка рассматривается как композиционный материал. Поскольку целью данной работы является наиболее полное и точное описание НДС заготовки, для решения поставленной задачи применялась методика описания среды как композиционного материала. Рассмотрим методы моделирования с выявлением их достоинств и недостатков.

### Методы моделирования

Аналитические методы, основанные на теории вероятностей, случайных процессов, методах оптимизации и др., заключаются в выводе математических символов и зависимостей последовательным применением математических правил. Достоинство – в отсутствии необходимости при-

менения вычислительных машин и возможность решения в явной аналитической форме. Недостаток – в невозможности получения необходимых математических отношений для тел сложной геометрии и недостаточной точности результатов решения вследствие большого числа допущений.

Численные методы, основанные на замене математических операций и отношений соответствующими операциями над числами. Достоинство – сравнительно с аналитическими методами более широкий круг решаемых задач и возможность оценочного расчета тел простой формы без применения вычислительных машин. Недостаток, как и для аналитических методов, – малая точность вследствие большого числа допущений.

Метод конечных элементов основан на построении имитационной модели, объединяющей свойства отдельных элементов в единую систему. Преимущество метода, прежде всего, в его универсальности. С помощью данного метода возможно выполнить разбиение на конечные элементы тела любой формы. В этом случае ограничения будут только во времени, необходимом на вычисление, поскольку сложная форма изделия предполагает разбиение на большее число элементов, что в свою очередь увеличивает общее время расчета. Недостаток – в необходимости применения специализированных программных средств [6], зависимость результатов расчета от выбора базисных функций и отсутствие общепринятого и теоретически обоснованного метода оценки погрешности расчета. В результате чего перед применением метода с определенным набором базисных функций на сложной инженерной задаче рекомендуется сравнение результатов расчета более простой задачи с аналогичными начальными условиями методом конечных элементов с экспериментом. При этом необходимо отметить особенность метода, заключающуюся в подборе поля перемещений с учетом минимизации некоторого функционала, имеющего энергетический смысл. Поэтому точность определения упругой энергии, запасенной в конструкции при заданных нагрузках, оказывается выше, чем точность определения перемещений. В свою очередь точность определения напряжений ниже точности определения перемещений, поскольку напряжения определяются по деформациям, полученным дифференцированием перемещений. В этом случае погрешность численного дифференцирования может быть существенной. С учетом этого, хотя уменьшение характерного размера конечного элемента уменьшает ошибки дискретизации, являющиеся результатом геометрических различий физического тела и модели, чрезмерно большое число конечных элементов увеличивают погрешность, связанную с ошибками округления.

При выборе конечных элементов, на которые предполагается разбиение модели, необходимо выполнение условия непрерывности поля перемещений в конструкции. Для этого должно быть совпадение вершин соседних конечных элементов. В противном случае, базисная функция не будет непрерывной даже в случае заполнения конечными элементами всей конструкции без пустот. С физической точки зрения это будет эквивалентно наличию разрыва (трещины) в конструкции [7].

Для качественного и количественного описания среды применяются математические модели. Моделирование используется в случаях, когда прямой эксперимент с объектом трудновыполним, невыгоден с экономической точки зрения или невозможен.

### Исследование напряженно-деформированного состояния с учетом неоднородности структуры

В общем случае неоднородность структуры металлических материалов можно рассматривать на трех уровнях:

Макроуровень. Неоднородность структуры, различаемая невооруженным глазом, например биметаллическая сталемедная проволока.

Мезоуровень. Структура железоуглеродистых сплавов, при увеличении в оптическом микроскопе, например неметаллические включения в металлах.

Микроуровень. Строение материала, выявляемое с помощью микроскопа, преимущественно электронного, например, рассмотрение структуры зернистого перлита как ферритная матрица, дисперсно-упрочненная включениями цементита.

В данной работе исследовано НДС при обработке давлением на макро- и мезоуровнях.

С целью оценки возможности моделирования неоднородности структуры материала на макроуровне проведено математическое моделирование процесса осадки биметаллической сталемедной катанки (рис. 1) в программных комплексах Simulia Abaqus и Deform-3D (рис. 2).

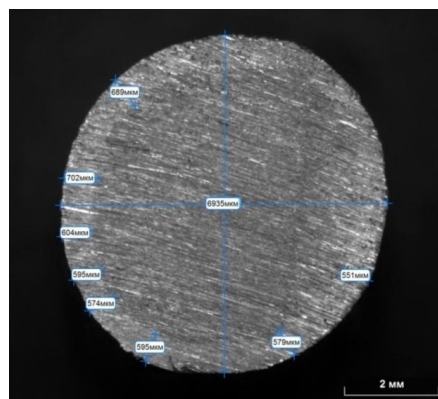
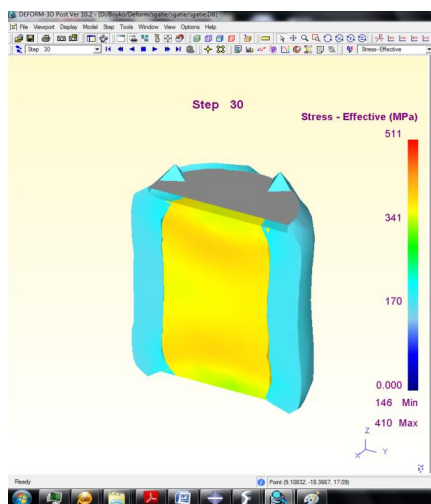


Рис. 1. Поперечное сечение сталемедной катанки

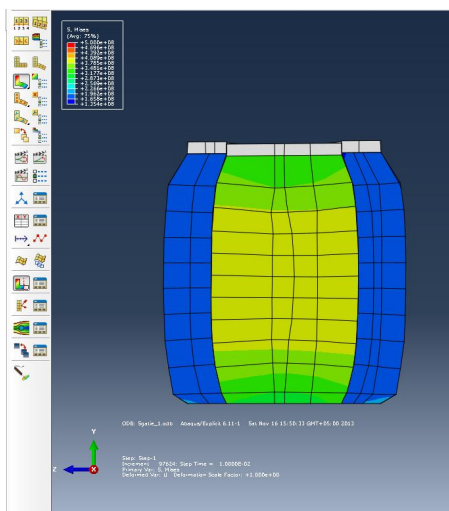


В таблице представлены механические свойства исследуемых материалов.

Показатель	Материал сердечника (сталь)	Материал оболочки (медь)
Предел текучести, МПа	250	120
Предел прочности, МПа	410	250
Модуль упругости, ГПа	210	100
Коэффициент Пуассона	0,28	0,35



а



б

**Рис. 2. Формоизменение и НДС заготовки в процессе равномерного сжатия на 30%. Моделирование выполнено в Deform-3D (а) и Abaqus (б)**

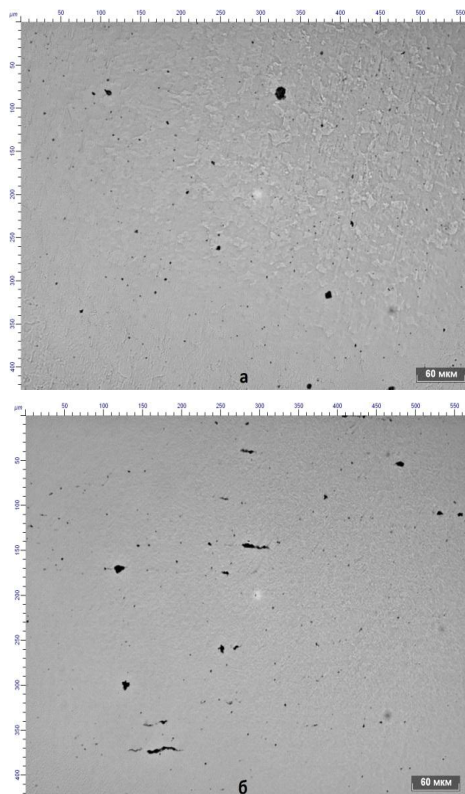
Как видно из результатов моделирования, напряженное состояние заготовки в двух программных комплексах различается незначительно. Максимальные напряжения, рассчитанные Deform-3D при осадке на 30%, в стальном сердечнике – 380 МПа, в медной оболочке – 180 МПа. Максимальные напряжения, рассчитанные Sim-

ulia Abaqus, 408 и 196 МПа соответственно. При моделировании в Simulia Abaqus заготовка приобретает бочкообразную форму при относительном обжатии 30%, модель, выполненная в Deform-3D, также начинает приобретать бочкообразную форму, но менее выраженную.

В результате сравнения программных комплексов, их можно использовать при моделировании процессов формоизменения заготовок сплошного сечения. Однако отсутствие подходящего инструментария в Deform-3D не позволяет с его помощью проводить моделирование дискретной структуры материала на мезоуровне, например, при наличии в заготовке для дальнейшего передела в процессах ОМД неметаллических включений и пор. Данная задача решается с помощью программного комплекса Simulia Abaqus.

Исследование НДС при рассмотрении структуры на мезоуровне представлено в процессе волочения заготовки с неоднородностью структуры в виде неметаллических включений.

Для проведения металлографических испытаний в продольном и поперечном направлении с целью определения распределения неметаллических включений по сечению заготовки (рис. 3) и оценки их количественного содержания с помощью программного обеспечения ThixometPro отобраны образцы катанки диаметром 15,5 мм из стали 80.



**Рис. 3. Микроструктура катанки стали марки 80 в поперечном (а) и продольном (б) сечениях после горячей прокатки**

В результате исследования микроструктуры значительного количества пластичных включений и разрушенных в результате деформации вытянутых в сплошные строки хрупких включений согласно ГОСТ 1778 не обнаружено. Включения преимущественно представляют собой недеформирующиеся (глобулярные) единичные включения оксидов (рис. 4), в результате чего целесообразно моделирование неметаллических включений при деформации холодным волочением как тел, обладающих упругими свойствами.

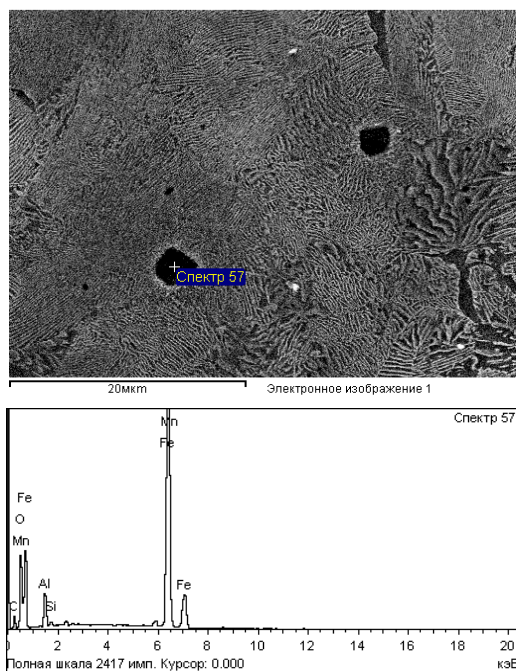


Рис. 4. Электронное изображение и анализ химического состава включения

Проведено исследование процесса волочения проволоки из стали марки 80P с диаметра 15,5 до 9,98 мм, предназначенной для армирования железобетонных шпал. Данный вид продукции является ответственным и требующим анализа НДС с целью определения факторов, оказывающих наибольшее влияние на механические свойства заготовки и готовой продукции. Неметаллические включения  $Al_2O_3$  заданы только упругими свойствами и не подвержены пластической деформации.

Моделирование волочения проволоки выполнено по действующему маршрутам в ОАО «ММК-МЕТИЗ»:

15,5 мм – 14,78 мм – 13,48 мм – 12,38 мм – 11,46 мм – 10,68 мм – 9,98 мм.

Неметаллические включения способствуют повышению значений эквивалентных напряжений в непосредственной близости от включений до 974 МПа при средних значениях вне очага деформации 650 МПа. Исследования структуры на развитие трещин [8–12], в том числе с помощью электронного микроскопа [13–14] подтверждают, что неме-

таллические включения являются концентраторами напряжений и источниками зарождения трещин. В результате моделирования волочения проволоки выявлены минимальные эквивалентные напряжения по оси заготовки, при наличии включений в данной области (рис. 5) напряжения вблизи включений увеличиваются, но запаса прочности достаточно для волочения без обрыва заготовки.

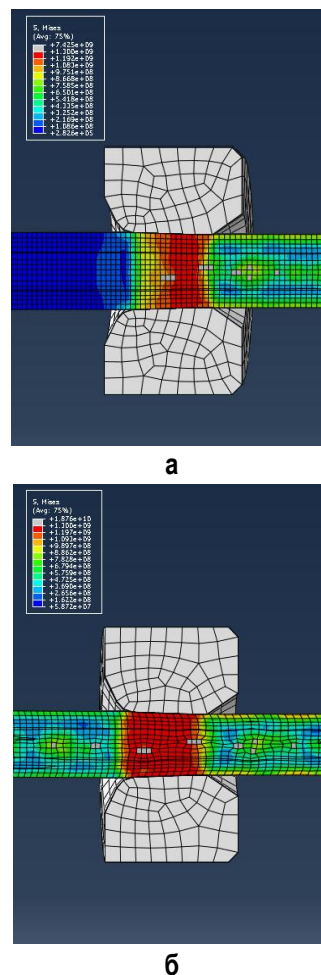


Рис. 5. Распределение НДС по сечению заготовки при волочении в первой (а) и третьей проволоке (б)

### Закключение

В результате исследования определено влияние неоднородности структуры на напряженно-деформированное состояние в процессах обработки давлением. На основании обзора методов моделирования определен метод конечных элементов как наиболее подходящий для решения поставленной задачи с возможностью рассмотрения дискретности исследуемой среды.

### Список литературы

1. Bichler C., Pippin R. Direct observation of the residual plastic deformation caused by a single tensile overload. Proc. 2nd Symp. on Fatigue Crack Closure, Measurement and Analysis, ASTM STP. 1999.
2. Christ H.-J., Mughrabi H. Cyclic stress-strain response and mi-

- crostructure under variable amplitude loading. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 1996. № 19. P.335.
- Hertzberg, R.W. *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*, Wiley. New York, 1996.
  - Murakami Y. *The stress intensity factors handbook*, Pergamon Press. New York, 1987.
  - Tada H., Paris P.C., Irwin, G.R. *The stress analysis handbook*, 3rd edition, ASME Press. New York, 2000.
  - Барышников М.П., Чукин М.В., Бойко А.Б. Анализ программных комплексов для расчета напряженно-деформированного состояния композиционных материалов в процессах обработки давлением // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 4. С. 72–74.
  - Чернявский А.О. Метод конечных элементов. Основы практического применения [Электронный ресурс] ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ). URL: [http://pent.sopro.susu.ac.ru/LRN/0711/smm/files/fea\\_4c.pdf](http://pent.sopro.susu.ac.ru/LRN/0711/smm/files/fea_4c.pdf).
  - Düber O., Künkler B., Krupp, U., Christ, H.-J., Fritzen, C.-P. Experimental characterization and two-dimensional simulation of short-crack propagation in an austenitic-ferritic duplex steel. *International Journal of Fatigue*. №28. 2006. P. 983.
  - Моделирование процесса волочения стальной проволоки с учетом неоднородности структуры в программном комплексе SIMULIA ABAQUS / Барышников М.П., Чукин М.В., Гун Г.С., Бойко А.Б. // Пластическая деформация металлов. Днепропетровск. 2014. С. 156–158.
  - Stolarz J. Influence of microstructure on low-cycle fatigue in some single-phase and biphasic stainless steels. *Proc. Intl. Conf. on Low Cycle Fatigue*, P.D. Portella, H. Sehitoglu, K. Hatanaka Eds. Berlin, 2004.
  - Blochwitz C., Tirschler W. In-Situ scanning electron microscope observations of the deformation behaviour of short cracks. *Materials Science and Engineering*. 2000. P. 273.
  - Nakajima K., Terao K., Miyata T. The effect of microstructure on fatigue crack propagation of  $\alpha+\beta$  titanium alloys. *Materials Science and Engineering*. 1998. P. 176.
  - Richter R., Tirschler W., Blochwitz C. In-situ scanning electron microscopy of fatigue crack behaviour in ductile materials. *Materials Science and Engineering*. 2001. P. 237.
  - Williams D.B. Carter C.B. *Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials Science*. Plenum Press. New York, 1996.

### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

## RESEARCH METHODS OF MECHANICAL PROPERTIES OF METALS AND ALLOYS DURING THEIR FORMING SUBJECT TO AN INHOMOGENEOUS STRUCTURE

**Baryshnikov Mikhail Pavlovich** – Ph.D. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: [arcosmag@mail.ru](mailto:arcosmag@mail.ru).

**Chukin Mikhail Vitalevich** – D. Sc. (Eng.), Professor, First Vice-Rector – Vice-Rector for Science and Innovation, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: [m.chukin@mail.ru](mailto:m.chukin@mail.ru).

**Boyko Artem Borisovich** – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: [boyko.ab@mail.ru](mailto:boyko.ab@mail.ru).

**Dyja Henrik** – D.Sc. (Eng.), Professor, Director of the Institute of Metal Forming and Engineering Security, Czestochowa University of Technology, Poland. E-mail: [dycja@wip.pcz.pl](mailto:dycja@wip.pcz.pl).

**Nazaybekov Abdrakhman Batyrbekovich** – Academician, D.Sc. (Eng.), Professor, Rector of Rudny Industrial Institute, Kazakhstan. E-mail: [rector@rii.kz](mailto:rector@rii.kz).

**Abstract.** This article presents studies of the effect of heterogeneous structural components on a stress and strain state in processes of forming metals and alloys. A review of modeling techniques including their strengths and weaknesses is made. The article presents an analysis of the microstructure of wire rod and determines a type of non-metallic inclusions for finite element modeling in a software package. A finite element method was used to model prestressing of bimetallic copper-clad steel rods and drawing of high-tensile reinforcement bars manufactured from steel grade 80R.

**Keywords:** inhomogeneity of the structure, microstructure, nonmetallic inclusions, finite element method.

### References

- Bichler C., Pippan R. Direct observation of the residual plastic deformation caused by a single tensile overload. *Proc. 2nd Symp. on Fatigue Crack Closure, Measurement and Analysis*, ASTM STP. 1999.
- Christ H.-J., Mughrabi H. Cyclic stress-strain response and microstructure under variable amplitude loading. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 1996, no 19, p. 335.
- Hertzberg R.W. *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*. New York: Wiley, 1996.
- Murakami Y. *The stress intensity factors handbook*. New York: Pergamon Press, 1987.
- Tada H., Paris P.C., Irwin, G.R. *The stress analysis handbook*. 3rd edition. New York: ASME Press, 2000.
- Baryshnikov M.P., Chukin M.V., Boyko A.B. Analysis of software packages used to calculate a stress and strain state of composite materials in forming processes. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2012, no. 4, pp. 72–74.
- Chernyavsky A.O. The finite element method. Fundamentals of practical application [Electronic resource]. FSBEI HPE SUSU (NRU). URL: [http://pent.sopro.susu.ac.ru/LRN/0711/smm/files/fea\\_4c.pdf](http://pent.sopro.susu.ac.ru/LRN/0711/smm/files/fea_4c.pdf).
- Düber O., Künkler B., Krupp, U., Christ, H.-J., Fritzen, C.-P. Experimental characterization and two-dimensional simulation of short-crack propagation in an austenitic-ferritic duplex steel. *International Journal of Fatigue*, 2006, no. 28, p. 983.
- Baryshnikov M.P., Chukin M.V., Gun G.S., Boyko A.B. Modeling of the process of drawing steel wire taking into account heterogeneity of the structure in the SIMULIA ABAQUS complex software. *Plastic deformation of metals*. Dnepropetrovsk, 2014, pp. 156–158.
- Stolarz J. Influence of microstructure on low-cycle fatigue in some single-phase and biphasic stainless steels. *Proc. Intl. Conf. on Low Cycle Fatigue*, P.D. Portella, H. Sehitoglu, K. Hatanaka Eds. Berlin, 2004.
- Blochwitz C., Tirschler W. In-Situ scanning electron microscope observations of the deformation behaviour of short cracks. *Materials Science and Engineering*. 2000, p. 273.
- Nakajima K., Terao K., Miyata T. The effect of microstructure on fatigue crack propagation of  $\alpha+\beta$  titanium alloys. *Materials Science and Engineering*. 1998, p. 176.
- Richter R., Tirschler W., Blochwitz C. In-situ scanning electron microscopy of fatigue crack behaviour in ductile materials. *Materials Science and Engineering*. 2001, p. 237.
- Williams D.B. Carter C.B. *Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials Science*. New York: Plenum Press, 1996.