



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 4, 2018

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI: 10.15593/perm.mech/2018.4.01

УДК 621.771

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ ПРИ КОВКЕ

В.А. Андреященко, Ю.Б. Ичева

Екибастузский инженерно-технический институт им. академика К. Сатпаева,
Екибастуз, Республика Казахстан

О СТАТЬЕ

Получена: 03 июля 2018 г.
Принята: 9 ноября 2018 г.
Опубликована: 28 декабря 2018 г.

Ключевые слова:

конструкционная сталь,
компьютерное моделирование,
DEFORM, интенсивная
пластическая деформация,
микроструктура,
субультрамелкозернистые
материалы, механические
свойства, твердость.

АННОТАЦИЯ

В качестве объекта исследования выбрана конструкционная сталь, подвергнутая кузнечным операциям, в том числе интенсивной пластической деформации. Цель работы – оценить роль интенсивной пластической деформации при ковке стальных заготовок. В работе выполнено компьютерное моделированиековки стали марок 20, 45 и 40X в программном комплексе DEFORM 3D. Проведен подробный анализ напряженно-деформированного состояния заготовок при деформировании, а также силовых параметров процесса. В результате анализа выявлено, что напряженно-деформированное состояние существенно зависит от материала заготовки. Увеличение содержания углерода в стали способствует росту значений интенсивности напряжений и интенсивности деформаций. Выбор наиболее оптимальных параметров процесса для различных технологических условий с использованием моделирования в программном комплексе DEFORM 3D вполне оправдан и может дать конкретные результаты, причем даже для сложных деформационных процессов. В промышленных условиях изучено деформационное поведение стали марок 20, 45 и 40X при реализацииковки осадкой со степенью деформации при осадке 30% и при интенсивном пластическом деформировании методомковки в трапециевидных бойках стали 45. В результате осадки происходит формирование равномерной микроструктуры с баллом зерна 7. Применение сдвиговой деформации способствует интенсификации ротационного механизма деформации. Реализация сдвиговых деформаций обеспечивает измельчение зерна до 8 балла. Кроме того, твердость стали 45 после реализации интенсивной пластической деформации возросла более чем на 13% по сравнению с металлом, полученным традиционной осадкой, и составила 164,8 НВ. Выявлено влияние технологических параметровковки на микроструктуру и свойства конструкционной стали, особенно на преобладающий механизм деформации.

© ПНИПУ

© Андреященко Виолетта Александровна – к.т.н., доц., e-mail: Vi-ta.z@mail.ru, [ID 0000-0001-6933-8163](https://orcid.org/0000-0001-6933-8163)

Ичева Юлианна Борисовна – к.т.н., зав. каф., e-mail: isheva1967@mail.ru, [ID 0000-0001-5914-9772](https://orcid.org/0000-0001-5914-9772)

Violetta A. Andreyachshenko – CSc in Technical Sciences, Associate Professor,

e-mail: Vi-ta.z@mail.ru, [ID 0000-0001-6933-8163](https://orcid.org/0000-0001-6933-8163)

Yulianna B. Isheva – CSc in Technical Sciences, Head of Department,

e-mail: isheva1967@mail.ru, [ID 0000-0001-5914-9772](https://orcid.org/0000-0001-5914-9772)



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

FEATURES OF DEFORMATION BEHAVIOR OF STRUCTURAL STEEL DURING FORGING

V.A. Andreyachshenko, Yu.B. Isheva

Ekibastuz Technical and Engineering Institute named after the Academician K. Satpayev,
Ekibastuz, Republic of Kazakhstan

ARTICLE INFO

Received: 03 July 2018
Accepted: 09 November 2018
Published: 28 December 2018

Keywords:

structural steel, computer simulation, DEFORM, severe plastic deformation, microstructure, ultra-fine-grained materials, mechanical properties, hardness.

ABSTRACT

The paper presents the studies of the structural steel subjected to forging including severe plastic deformations. The purpose of this work is to evaluate the role of severe plastic deformations during the forging of steel blanks. The computer simulation of the operations of forging steels of grades 20, 45 and 40H in the software complex DEFORM 3D was performed. A detailed analysis of the stress-strain state of the blanks during deformation is carried out, as well as the load schedule. As a result of the analysis it was revealed that the nature of the stress-strain state under equal conditions is determined by the material of the billet. An increase in stress and strain effectiveness is shown depending on carbon increasing in steel under identical conditions. The choice of the most optimal process parameters for different technological conditions using simulation in the DEFORM 3D software complex is completely justified, and can yield concrete results, even for complex deformation processes. The deformation behavior of 20, 45, and 40H steels was studied during forging with a degree of deformation at a draft of 30 % and with severe plastic deformation by the forging method in trapezoidal dies of steel 45 in industrial conditions. As a result of the forging, a uniform microstructure with a grain score 7 is formed. The use of severe plastic deformation promotes the intensification of the rotational deformation mechanism. The implementation of shear deformations provides grain refinement to 8 points. In this case, the hardness of steel 45 after the realization of severe plastic deformation increased by more than 13 % compared to the metal obtained by the conventional sediment and amounted to 164.8 HB. The influence of technological features of forging on the microstructure and properties of structural steel, especially on the prevailing deformation mechanism is revealed.

© PNRPU

Введение

В последние годы интенсивно создаются технологии обработки, основанные на методах интенсивной пластической деформации (ИПД). Методы интенсивной пластической деформации эффективны для измельчения микроstructures широкого спектра материалов, что приводит к значимому улучшению прочностных характеристик при достаточном уровне пластичности [1–11]. При этом перед исследователями стоит важная задача повышения качества получаемых заготовок при минимальных материальных и энергетических затратах. Рост механических свойств заготовок при улучшении структуры металла обуславливает высокую технологичность последующей переработки, что снижает издержки, себестоимость и повышает спрос на данный вид продукции. Обеспечивается более высокая конкурентоспособность в условиях рыночной экономики. Улучшение качества заготовок при снижении их себестоимости в условиях массового производства позволяет создавать новую высокотехнологичную продукцию, в том числе для изготовления новых видов металлоизделий. В статье [12] на основании многочисленных работ отечественных и зарубежных исследователей выполнен анализ факторов, влияющих на параметрыковки крупных поковок. Выявлено, что на качество поковки оказывает большое влияние напряженно-деформированное состо-

яние (НДС). Все факторы, влияющие на НДС заготовки в процессековки, можно разделить на три группы: форма инструмента и заготовки, кинематический фактор и температурный фактор. При деформировании металла с целью измельчения структурных составляющих большое значение имеет макросдвиговая деформация. Положительная роль макросдвигов в деформационной проработке структуры заключается в появлении микролиний скольжения (микросдвигов) в большом количестве зерен с различной кристаллографической ориентировкой, для которых границы зерен не являются препятствием. Подобные изменения микроstructures металла способствуют измельчению зерен, положительно влияют на уровень механических свойств и могут быть достигнуты путем использования новых схемковки, обеспечивающих высокий уровень сдвиговых деформаций в заготовке [13, 14]. В настоящее время идет активная разработка инновационных способовковки, которые позволяют интенсифицировать проработку внутренних слоев слитка без существенного изменения его размеров, при этом основные из них связаны с реализацией макросдвигов материала заготовки [15–17]. В работе [14] макросдвиги образуются за счет изменения формы очага деформации при протяжке в вырезных комбинированных бойках несимметричной формы. Авторы работы [18] используют ступенчатые бойки для лучшей проработки осевой зоны заготовки

и снижения количества проходов ковки. Согласно работе [19] повышение уровня и равномерности распределения механических свойств поковки за счет дополнительной проработки металла закручиванием, а также повышение производительности ковки путем достижения требуемых механических свойств при меньших улогах достигается использованием инструмента для протяжки заготовок с закручиванием. Также известен инструмент для протяжки [20], содержащий верхний и нижний бойки с цилиндрическими рабочими поверхностями для создания оптимальной технологии ковки и развития благоприятной картины НДС в заготовке. Кроме того, для получения высококачественных заготовок используют всестороннюю ковку [21] или ковку металла при двукратном ходе пуансонов в противоположных направлениях [22, 23].

Другим вариантом усиления проработки структуры является ковка нецилиндрических заготовок, например трехлучевой или многолучевой формы [24, 25].

Большинство промышленных сплавов в литом состоянии состоит из относительно крупных зерен (размером $d > 100$ мкм). В промышленности для измельчения микроструктуры сплавов используются такие традиционные методы, как холодная обработка с последующим рекристаллизационным отжигом, термическая обработка, основанная на фазовых превращениях, и термомеханическая обработка, которые позволяют измельчить микроструктуру до уровня размера зерен $d \approx 1...10$ мкм. Такие промышленные методы, как прокатка, экструзия, волочение и другие, ведущие при больших пластических деформациях к двумерным и одномерным полуфабрикатам, относятся к монотонным методам деформационной обработки. Специфика указанных методов заключается в большом контактном трении, возникающем между инструментом и заготовкой, которое создает значительные растягивающие напряжения. Наиболее существенное ограничение, которое налагается монотонными методами, их неспособность обеспечить (несмотря на большие степени деформации) получение ультрамелкозернистого материала с высокой долей большеугловых границ зерен и относительно изотропными механическими свойствами. Это ограничение действует и при низких, и при высоких гомологических температурах [26]. Различные металлы и сплавы с ультрамелкозернистой структурой, полученной интенсивной пластической деформацией (ИПД), демонстрируют значительно более высокие прочностные характеристики, чем крупнозернистые сплавы. Получить дополнительное упрочнение сплава возможно при комбинации разных видов нагружения. Вид нагружения оказывает влияние на кинетику микроструктурной эволюции и на однородность получаемой микроструктуры. Этот эффект используется и в методах ИПД, в частности, при немонотонном нагружении. Примером немонотонного нагружения является всесторонняя ковка; смена схемы главных напряжений реализуется в результате поворота заготовки последовательно относительно трех осей [27].

В настоящее время материалы с субультрамелкозернистой структурой (в том числе аустенитные и мартенситные стали, легкие и цветные материалы и композиты) получают преимущественно методами холодного пластического деформирования [28–30]. Авторы работы [31] показывают возможность создания ультрамелкозернистых материалов также в процессе горячей пластической деформации. Кроме того, для разработки непрерывных методов интенсивной пластической деформации, приводящих к формированию ультрамелкозернистой структуры в металлах и сплавах, используют комбинированные или совмещенные процессы. Авторы работы [32] указывают, что комбинированием процессов равноканального углового прессования и прокатки, а также их вариаций можно получать либо полосовую сталь, либо заготовку квадратного сечения. В работе [33] показана возможность производства длинномерных заготовок методом радиально-сдвиговой прокатки, при этом внешний слой проката обладает изотропной мелкодисперсной структурой. Внутренний слой сохраняется волокнистым. С технико-экономической точки зрения получение прутков прокаткой является наиболее простым, однако при рассмотрении общей структуры себестоимости стержневого проката оказывается, что основную часть в себестоимости составляет цена заготовки (91,6%) [34]. Известно, например, применение радиально-ковочных машин для производства сплошных и полых сортовых профилей постоянного и переменного по длине сечения из специальных сталей путем горячей и холодной пластической деформации [35].

Таким образом, исследования, направленные на изучение процессов получения субультрамелкозернистых структур, являются весьма актуальными. Как уже было сказано, наиболее распространенным методом получения субультрамелкозернистых и/или наноструктурных материалов является интенсивная пластическая деформация. При этом интенсивная пластическая деформация реализуется в новых устройствах, разработанных на основе таких традиционных процессов, как прокатка, прессование, волочение и ковка. Отличительной особенностью такой обработки является траектория движения частиц (слоев) металла и немонотонность приложения основной нагрузки. Структурные изменения, протекающие при интенсивной пластической деформации, обеспечивают повышение механических и эксплуатационных свойств. Направление влияния ИПД определяется традиционными (температура деформирования, скорость деформации, трение) и специальными (геометрия инструмента, форма заготовки) факторами. Как правило, даже незначительное изменение геометрии инструмента приводит к существенному влиянию на формируемую микроструктуру и, следовательно, проявляемые обрабатываемым материалом свойства. Особый интерес представляет изучение влияния геометрии инструмента на механизм измельчения зерна и изменения свойств материала заготовки.

Цель настоящей работы – оценить влияние интенсивной пластической деформации на напряженно-деформированное состояние, микроструктуру и твердость стальных заготовок при ковке.

Задачи работы включают постановку численного и реального экспериментов. К задачам численного эксперимента относится детальный анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) заготовок, подвергнутых ковке осадкой. Проведение сравнения НДС при традиционной осадке и при интенсивной пластической деформации. Выполнение исследования НДС и оценки потребного усилия деформирования с использованием актуального метода конечных элементов в среде DEFORM. Задачами реального эксперимента являются постановка и проведение физического эксперимента в промышленных условиях, изучение микроструктуры и твердости полученных заготовок.

1. Методика проведения исследований

При разработке технологических процессов обработки металлов давлением приходится сталкиваться с необходимостью определения расчетным путем усилия, работы и мощности деформации. Кроме того, для расчета прочности и износостойкости кузнечного инструмента (штампов, контейнеров, матриц и т.п.) нужно знать контактные (на поверхностях деформируемый металл–инструмент) нормальные и касательные напряжения. Современные системы автоматизированного проектирования (САПР) предоставляют широкий выбор средств для моделирования и инженерного анализа процессов деформирования. К числу наиболее распространенных в настоящее время методов оценки напряженно-деформированного состояния относятся: метод построения полей линий скольжения в деформируемом металле; метод конечных элементов; вариационный (энергетический) метод; метод верхней оценки; метод совместного решения приближенных уравнений равновесия и пластичности; экспериментальные методы [36].

В настоящее время компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением (ОМД) методом конечных элементов (МКЭ) доказало свою эффективность [37]. Сущность МКЭ заключается в следующем: примени-

тельно к плоской задаче система уравнений равновесия, условия пластичности и граничных условий на поверхности деформируемого объекта заменяется эквивалентным ей выражением принципа возможных перемещений для приращения напряженного состояния. Это выражение в интегральной форме связывает компоненты вектора возможных перемещений с компонентами тензора деформаций и уравнениями Коши. Деформируемая область металла разбивается на конечные элементы. Внутри каждого элемента компоненты тензора деформаций аппроксимируются функциями, линейными относительно координат, после чего определяются значения компонент тензора деформаций в узловых точках. Далее двойной интеграл в выражении приращения напряженного состояния заменяется суммой интегралов по конечным элементам. Точность метода тем выше, чем на большее количество элементов разбита область деформирования. Таким образом, могут быть вычислены напряжения и деформации в каждой точке деформируемого объекта. При реализации компьютерного моделирования создается модель, включающая в себя все элементы и условия реального процесса. Применительно к исследуемой ковке осадкой это верхний и нижний бойки, заготовка, а также граничные условия. Обычно полагают, что процесс деформации происходит в изотермических условиях. При горячем деформировании распределение температуры по объему заготовки неравномерно вследствие неодинаковой теплоотдачи нагретого материала в окружающую среду и на контактных поверхностях материал–инструмент. Следует отметить, что при скоростях формоизменения, принятых в обработке металлов давлением, деформационное и скоростное упрочнение металла оказывает существенное влияние на силовой режим деформации, но мало сказывается на кинематике течения металла [38, 39]. Реализация метода конечных элементов при моделировании процесса деформирования заготовок осуществлялась в среде программного комплекса DEFORM 3D, позволяющего конструировать трехмерные модели, имеющие свойства объектов, моделирование которых производится. Для описания в процессе моделирования деформационного поведения обрабатываемого материала использованы зависимости, заложенные в программный комплекс DEFORM 3D (табл. 1).

Таблица 1

Функции и параметры, используемые в DEFORM 3D

Table 1

Functions and parameters used in DEFORM 3D

№ п/п	Наименование	Функция
1	Напряжение пластического течения	$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T)$
2	Критерий пластичности	Von Mises (фон Мизес)
3	Принцип упрочнения	Isotropic (Изотропный)
4	Интенсивность деформации	$\epsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2}$
5	Интенсивность напряжений	$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$

Примечание: $\bar{\sigma}$ – напряжение пластического течения, $\bar{\epsilon}$ – деформация, $\dot{\bar{\epsilon}}$ – скорость деформации, T – температура, ϵ_i – интенсивность деформации, $\epsilon_{1,2,3}$ – главные деформации, σ_i – интенсивность напряжений, $\sigma_{1,2,3}$ – главные напряжения.

Алгоритм, используемый для расчета в конечно-элементном пакете DEFORM, предполагает выполнение следующих расчетных процедур.

1. Создание геометрии заготовки и деформирующего инструмента. Существуют два основных способа задания геометрии инструмента и заготовки: использование так называемых булевых операций непосредственно в программном комплексе DEFORM 3D и создание двух/трехмерных моделей в специальных автоматизированных программах для инженерного проектирования. Использование специальных автоматизированных программ позволяет строить более сложные модели, так как они оснащены специальными инструментами, обеспечивающими создание практически любых конфигураций модели. Для создания моделей (геометрии) заготовки и оснастки использовалась система автоматизированного проектирования КОМПАС 3D. Создание моделей осуществлялось с учетом геометрического подобия.

2. Создание сетки конечных элементов и установка свойств заготовки и инструмента. Величина конечных элементов влияет на точность расчета. Деформируемое тело в модели было определено сеткой тетрагональных конечных элементов, распределенных в объеме заготовки. Общее количество конечных элементов заготовки выбрано равным 30 000, что позволяет производить расчет с достаточной точностью при размере заготовки 15×15×15 мм. После построения сетки задается материал заготовки и инструмента.

Механическое поведение деформируемого тела описано моделью пластического поведения, инструмент является жестким (недеформируемым). Материал оснастки и заготовки задавался выбором из базы данных программы. Для оснастки использована инструментальная сталь, для заготовок выбраны стали марок 20, 45 и 40х. Моделирование осуществлялось с учетом теплообмена (теплопередачи) между заготовкой, оснасткой и окружающей средой при нормальных условиях (температура окружающей среды принята равной 20 °С). Для инструмента выбрана комнатная температура. Температура заготовки задавалась в пределах кованного интервала и для всех рассматриваемых процессов и материалов составляла 950 °С.

3. Выбор граничных условий. Условия трения на поверхности контакта во многом определяют процесс протекания деформирования и соответственно силовые параметры и напряженно-деформированное состояние в очаге деформации. В данной работе коэффициент трения выбран равным 0,3 на основании ранее проведенных исследований [40–44].

4. Назначение движения. При установке движения определяется главный инструмент, который будет осуществлять деформирование (в нашем случае верхний боек), и задается для него направление и скорость движения. Для верхнего бойка задана постоянная скорость движения вдоль оси u .

5. Установка условий расчета и расчет.

Следующим этапом исследования было проведение реального физического эксперимента. Перед деформированием предварительно подготовленные заготовки нагревали в камерной индукционной печи до температуры 950 °С и после выдержки подвергали осадке на прессе. Деформирование осуществлялось в производственных условиях на предприятии ТОО «Курьлы-смет». После процесса осадки все образцы были разрезаны на темплеты для изучения микроструктуры и твердости.

Изучение микроструктуры осуществлялось на оптическом микроскопе (ОМ). Исследование микроструктуры выполнялось на специально подготовленных микрошлифах. Подготовка микрошлифов осуществлялась в следующей последовательности: вырезка темплетта из исследуемой области заготовки; получение плоской поверхности образца; шлифование плоскости образца; полирование плоскости образца; травление; изучение микроструктуры. Вырезка темплеттов осуществлялась на отрезном станке Labotom-3 фирмы Struers (Швейцария). В процессе резания образец и отрезной диск охлаждались водой со специальным лубрикантом, исключаящим окисление образца.

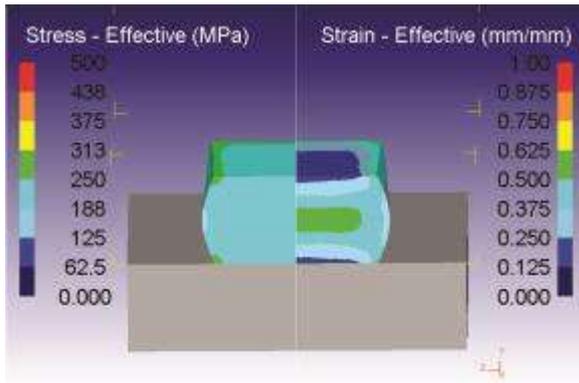
Шлифование и полирование производились на станке TegraForce/TegraPol фирмы Struers (Швейцария) по стандартной методике. При шлифовании использовались диски на магнитной основе и охлаждающие жидкости фирмы Struers. Далее образец подвергали тонкому полированию для удаления оставшихся после шлифования мелких дефектов, рисок и т.д. Для изучения на оптическом микроскопе образцы травил. В качестве травителя использовали реактив Ржешотарского (раствор 4% азотной кислоты в спирте). Балл зерна оценивали методом пересечений по ГОСТ Р ИСО 643–2011 «Сталь. Металлографическое определение наблюдаемого размера зерна».

2. Результаты исследования и их обсуждение

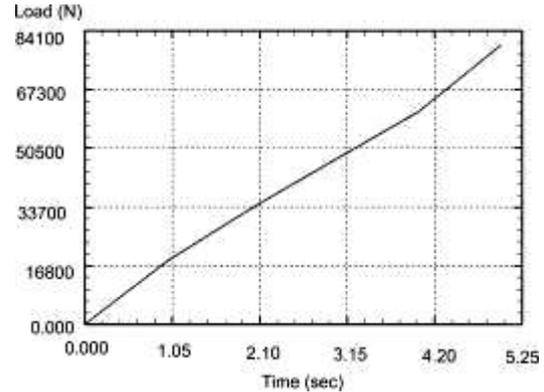
Выполненное моделирование позволяет оценить влияние материала заготовки на характер напряженно-деформированного состояния и силовые параметры (усилие деформирования). Традиционно считается, что основными параметрами, определяющими характер напряженно-деформированного состояния заготовок при деформировании, являются в первую очередь геометрия инструмента и деформируемых заготовок, температурно-скоростные условия процесса деформирования, граничные условия. К граничным условиям относятся коэффициенты трения и передачи теплоты от заготовки к ин-

струменту и обратно [45]. При решении рассматривается конечно-элементная модель, напряжение течения при расчете подчиняется условию $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T)$. Перемещения узлов конечных элементов определяют деформации с учетом величины деформации, скорости деформации и температуры. Деформационное поведение материала заготовки определяется графиками зависимостей между напряжением течения и деформацией с учетом всех приведенных факторов (температура, скорость деформации и величина деформации). Как показали результаты моделирования (рис. 1), с увеличением прочностных характеристик стали наблюдается уменьшение напряжения те-

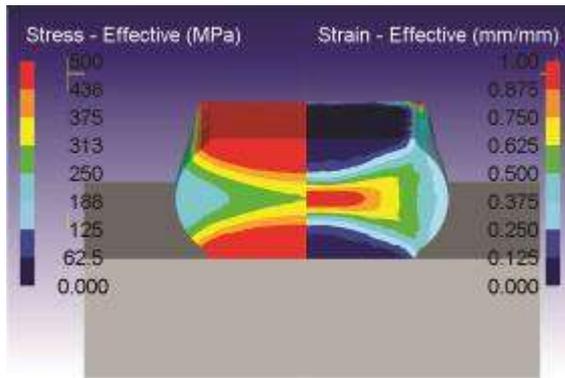
чения при идентичных параметрах. Для стали марки 20 при осадке на 30% наблюдается равномерное напряженное состояние для всего сечения заготовки с интенсивностью напряжений 250 МПа, для сталей 45 и 40Х четко выявляется ковошный крест при идентичных технологических параметрах. Интенсивность напряжений существенно выше для стали марки 45, чем для стали марки 40Х. Это говорит о том, что переход в пластичное состояние наступает раньше для сталей с низкими прочностными характеристиками, чем для сталей с более высокой прочностью.



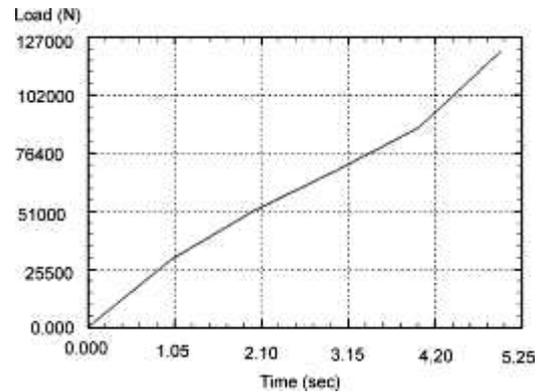
а



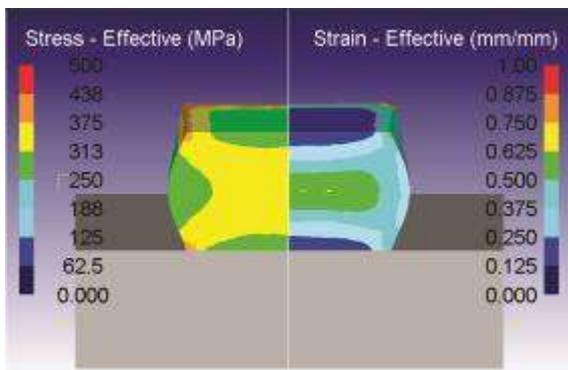
б



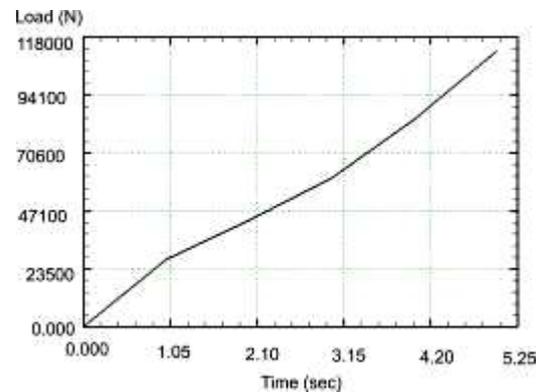
в



з



д



е

Рис. 1. Напряженно-деформированное состояние (а, в, д) после осадки на 30% и график усилия (б, з, е) заготовок из стали 20 (а, б), стали 45 (в, з), стали 40Х (д, е)
 Fig. 1. Stress-strain state (a, b, e) after a draft of 30 % and a graph of the load (b, d, e) of workpieces of steel 20 (a, b), steel 45 (c, d), steel 40H (d, e)

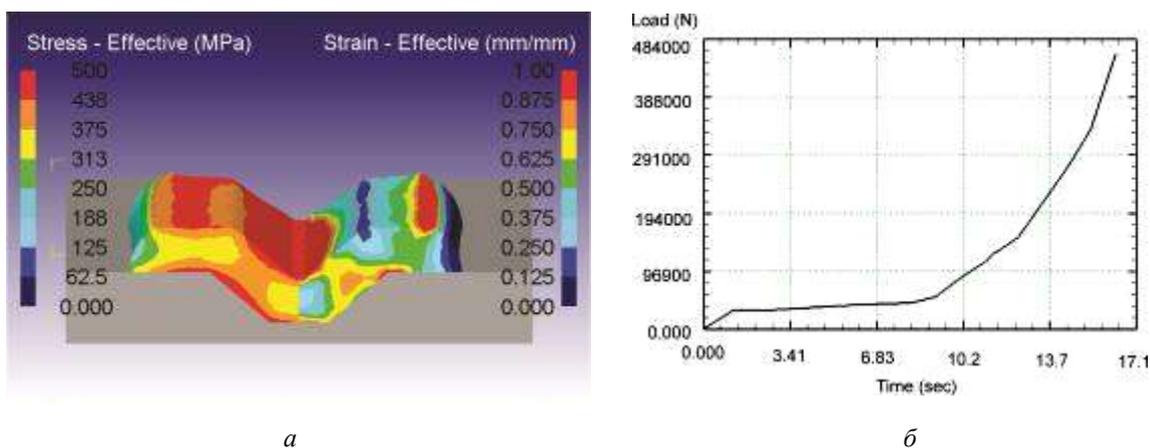


Рис. 2. Напряженно-деформированное состояние при деформировании стали 45 в трапециевидных бойках (а) и график усилия (б)
 Fig. 2. Stress-strain state during the deformation of steel 45 in trapezoidal dies (a) and the load graph (b)

При сравнении деформированного состояния сталей марок 20 и 45 видно, что для стали 45 развиваются деформации с большими по величине числовыми значениями интенсивности деформаций, чем для стали 20. Такой характер напряженно-деформированного состояния, естественно, находит отражение в кривых нагрузки. Числовые значения на графиках усилия можно сравнивать в связи с идентичностью всех параметров процесса, за исключением материала деформируемой заготовки. Полученную кривую нагрузки можно условно разделить на три основных участка. На первом участке наблюдается прямолинейный отрезок, расположенный примерно под углом 45 градусов к оси абсцисс. Отличия заключаются в протяженности первого участка. На втором участке наблюдается существенно меньший наклон кривой нагрузки, при этом для стали 20 второй участок заканчивается при усилии ~60 кН, для стали 45 ~90 кН, но он более протяжен. Далее начинается третий участок, на котором хорошо заметно увеличение угла наклона кривой для обеих сталей. По результатам видно, что сопоставление значений интенсивности напряжений и величин нагрузки, отнесенной к площади поперечного сечения заготовки, имеет хорошо заметную взаимосвязь.

Характер напряженно-деформированного состояния при осадке заготовок из стали марки 40Х аналогичен рассмотренным ранее для сталей 20 и 45. При этом сталь марки 40Х испытывает меньшие напряжения и деформации при идентичных условиях деформирования. График усилия и по характеру положения кривой нагрузки, и по числовым характеристикам более близок к деформированию стали 45, несмотря на то, что механические характеристики стали марки 40Х существенно превышают механические характеристики стали марки 45. При этом отметим, что формоизменение заготовок для всех трех сталей при осадке на 30% абсолютно идентично и полностью соответствует формоизменению заготовок при реализации физического эксперимента. Следующим шагом исследования было изучение напряженно-деформированного состояния при деформировании заготовок в бойках более сложной конфигу-

рации. Для анализа были выбраны трапециевидные бойки, реализующие интенсивную пластическую деформацию с элементами сдвиговых деформаций на наклонных участках бойков (рис. 2).

При моделировании выбрана одна из рассмотренных сталей – сталь 45 – с целью обеспечения возможности сравнения с уже изученным процессом. Деформирование осуществлялось с деформацией также на 30% с аналогичными температурно-скоростными параметрами процесса. Как видно, численные значения интенсивности напряжений и интенсивности деформаций имеют сопоставимые величины, при этом характер распределения напряжений и деформаций имеет принципиальные отличия, вызванные влиянием формы инструмента. Максимальные напряжения и деформации действуют на наклонных участках инструмента (в данном случае контактные зоны инструмента не учитываются), где действительно реализуются сдвиговые деформации. Крайние по длине заготовки области подвергаются действию только сжимающих напряжений, причем с внешних сторон эти зоны являются свободными. Вследствие этого в периферийных по длине заготовки областях фиксируются минимальные напряжения и деформации. Формоизменение моделируемой заготовки полностью совпадает с формоизменением реальных образцов. Кривая нагрузки имеет более сложный характер, поскольку в начальный момент деформирования заготовка подвергается изгибу и только после этого – осадке со сдвигом.

Таким образом, детальный анализ результатов моделирования показал, что график усилия при деформировании напрямую связан с реальным усилием на бойке или на плунжере пресса, определяется в первую очередь напряжениями, возникающими в образце при деформировании. Выбор наиболее оптимальных параметров процесса с использованием одного материала для различных технологических условий вполне оправдан и может дать конкретные результаты, причем даже для сложных деформационных процессов. Причиной неточностей деформационного поведения материалов, находящихся в базе данных программы, могут быть отличия при получении данных для построения модели

$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T)$. Наиболее достоверными будут результаты моделирования, полученные при использовании материалов, деформационное поведение которых описано зависимостями, непосредственно полученными для данных марок в лабораторных условиях.

Следующим этапом исследования был анализ влиянияковки на микроструктуру и твердость рассматриваемых сталей. Образцы из стали марок 20, 45 и 40Х были подвергнуты ковке осадкой со степенью деформации при осадке 30%. Также была реализована интенсивная пластическая деформация методом деформирования в

трапециевидных бойках стали 45. Ковка осуществлялась при ковочной температуре с последующим охлаждением на воздухе.

Микроструктура послековки представлена на рис. 3. Как видно, во всех случаях получена деформированная микроструктура без особенностей, представляющая собой феррито-перлитную смесь. С увеличением содержания углерода наблюдается большее количество перлита. Во всех случаях структура деформированная, границы зерен четкие, деформация протекает преимущественно в ферритной фазе.

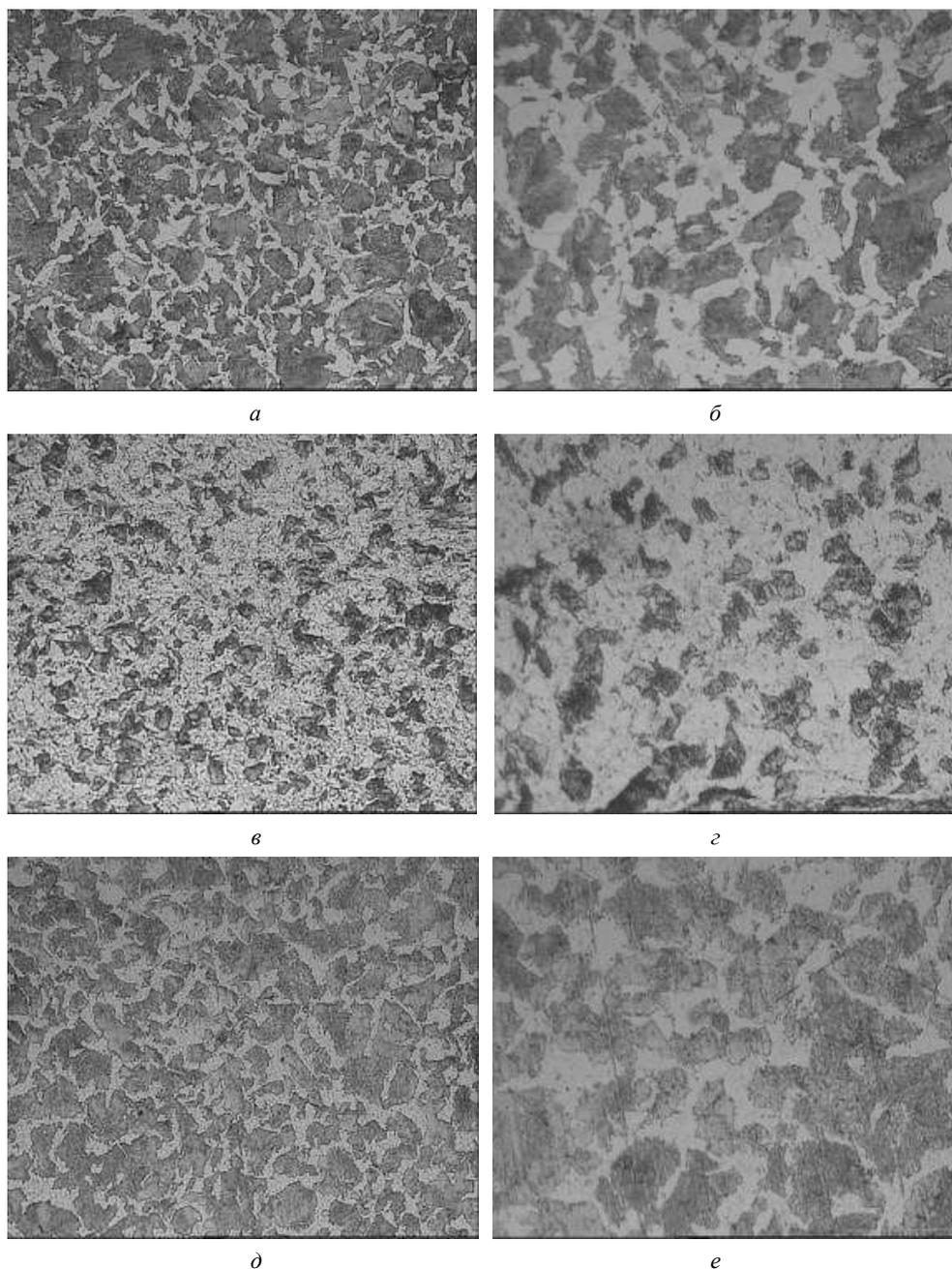


Рис. 3. Фотографии микроструктуры образцов из сталей марок 20 (а, б); 45 (в, г) и 40Х (д, е) после осадки на 30%, полученные при помощи ОМ при увеличениях x500 (а, в, д) и x1000 (б, г, е)
 Fig. 3. OM imaging of samples from steels of grades 20 (a, b), 45 (c, d) and 40H (d, e) after draft of 30%, obtained at magnifications of x500 (a, c, d) and x1000 (b, d, e)

При анализе микроструктуры образцов, деформированных с применением интенсивной пластической деформации в трапециевидных бойках, выявлено изменение характера протекания деформации (рис. 4). Деформация преимущественно протекает в перлитной фазе, обнаружен механизм ротационного вращения. Наблюдается поворот субзерен относительно друг друга в пределах перлитного зерна. Таким образом, интенсификация этого процесса приводит к преобразованию субзерен в зерна, способствуя существенному измельчению зерна. Кроме того, наблюдается вытеснение ферритных зерен и изменение их формы и размеров.

После реализации деформации ферритные зерна расположены преимущественно по границам перлитных колоний. При исследовании данного эффекта на низких увеличениях создается ошибочное представление о формиро-

вании видманштеттговой структуры, но изучение при более высоких увеличениях показывает особенности микроструктуры, полученной под воздействием сдвиговых деформаций. При изучении микроструктуры металла, расположенного в области изгиба/сдвига, выявлено еще большее искажение формы зерен. Наблюдается восстановление формы ферритных зерен. Ферритные зерна уже не расположены по границам перлитных, они имеют четко определенную форму и размеры и расположены в виде более равномерной феррито-перлитной смеси.

В табл. 2 представлены значения твердости и размер зерен после деформирования. Балл зерна стали марок 20, 45 и 40Х равен 7, учитывая, что деформирование осуществлялось в горячем состоянии, это соответствует нормативным документам. Увеличение содержания углерода и хрома приводит к повышению твердости.

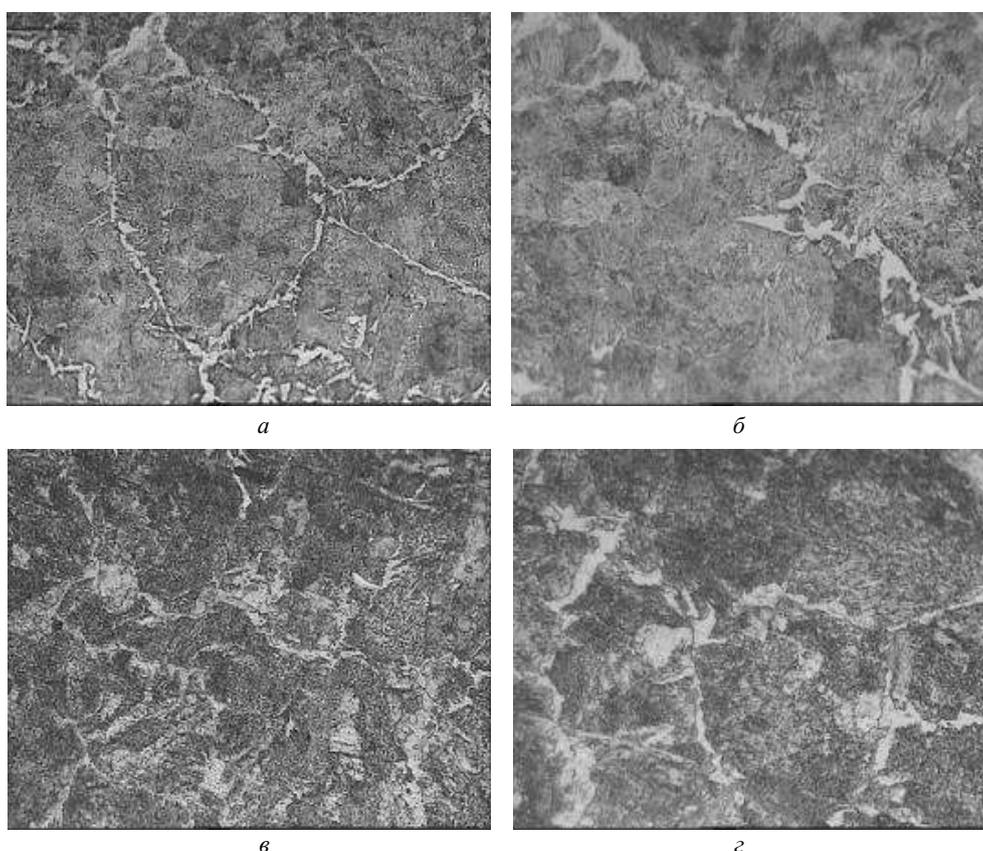


Рис. 4. Фотографии микроструктуры образцов из стали марки 45 после деформирования в трапециевидных бойках, полученные при помощи ОМ при увеличениях $\times 500$ (а, в) и $\times 1000$ (б, г) в области сжатия (а, б) и в области изгиба (в, г)
 Fig. 4. OM imaging of samples from steel of grades 45 after deformation in trapezoidal dies, obtained at magnifications by $\times 500$ (a) and $\times 1000$ (b) in the region of compression (a, b) and in the shear region (c, d)

Таблица 2

Балл зерна и твердость по Бринеллю стали послековки

Table 2

The grain score and Brinell hardness are after forging

Сталь	Вид операции	Балл зерна	Твердость по Бринеллю
20	Осадка	7	136
45	Осадка	7	145,4
40Х	Осадка	7	197,2
45	ИПД (область сжатия)	8	164,8
45	ИПД (область изгиба)	8	

При этом твердость стали 45 после реализации интенсивной пластической деформации возросла более чем на 13% по сравнению с металлом, полученным традиционной осадкой, и составила 164,8 НВ. Наблюдается измельчение зерна до 8 балла.

Таким образом, в промышленных условиях выявлено влияние технологических особенностейковки на преобладающий механизм деформации при применении сдвиговых деформаций, микроструктуру и свойства конструкционной стали.

Выводы

Исследована роль интенсивной пластической деформации при ковке заготовок из стали марок 20, 45 и 40Х.

Библиографический список

1. In vitro biological effects of titanium rough surface obtained by calcium phosphate grid blasting / A. Citeau, J. Guicheux, C. Vinatier, P. Layrolle, T.P. Nguyen, P. Pilet, G. Daculsi // *Biomaterials*. – 2005. – Vol. 26. – Iss. 2. – P. 157–165.
2. Characterization of the surface properties of commercially available dental implants using scanning electron microscopy, focused ion beam, and high-resolution transmission electron microscopy / T. Jarmar, A. Palmquist, R. Branemark, L. Hermansson, H. Engqvist, P. Thomsen // *Clinical Implant Dentistry and Related Research*. – 2008. – Vol. 10. – Iss. 1. – P. 11–22.
3. Strength, corrosion resistance, and biocompatibility of ultrafine-grained Mg alloys after different modes of severe plastic deformation / S.V. Dobatkin, E.A. Lukyanova, N.S. Martynenko, N.Y. Anisimova, M.V. Kiselevskiy, M.V. Gorshenkov, G.A. Salishchev // *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 194. – No. 1. – 012004. – P. 1–8. DOI: 10.1088/1757-899X/194/1/012004.
4. Room-Temperature Superplasticity in an Ultrafine-Grained Magnesium Alloy / K. Edalati, T. Masuda, M. Arita, M. Furui, X. Sauvage, Z. Horita, R.Z. Valiev // *Scientific Reports*. – 2017. – Vol. 7(1). – No. 2662. – P. 1–9. DOI: 10.1038/s41598-017-02846-2.
5. Enhancing Superplasticity of Ultrafine-Grained Ti–6Al–4V without Imposing Severe Plastic Deformation / D. Kim, J.W. Won, C.H. Park, J.K. Hong, T. Lee, C.S. Lee // *Advanced Engineering Materials*. – 2018. – 1800115. DOI.org/10.1002/adem.201800115.
6. Bruder E., Gangaraju C., Lapovok R. Influence of equal channel angular pressing on high cycle fatigue behavior of ultrafine-grained iron: Role of anisotropy // *Materials Science and Engineering: A*. – 2018. – Vol. 711. – P. 650–658.
7. Raab A.G., Bobruk E.V., Raab G.I. Ultrafine-grained pure Ti processed by new SPD scheme combining drawing with Shear // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2018. – Vol. 27. – No. 5. – P. 2414–2420.
8. Strengthening and toughening mechanisms of an ultrafine grained Mg-Gd-Y-Zr alloy processed by cyclic extrusion and compression / Q. Wang, Y. Mu, J. Lin, L. Zhang, H.J. Roven // *Materials Science and Engineering: A*. – 2017. – Vol. 699. – P. 26–30.
9. Ultrafine-grained multiphase steels with different microstructural constitutions fabricated through annealing of tempered and deformed martensite / X. Wang, R. Ding, J. He, A. Zhao, R. Liu // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2018. – Vol. 49(5). – P. 1439–1443.

Работа выполнена с использованием современных методов проектирования и анализа деформационных процессов, таких как КОМПАС 3D и DEFORM 3D. Проведен детальный анализ напряженно-деформированного состояния заготовок, обработанных ковкой, в том числе интенсивной пластической деформацией в трапециевидных бойках. Наблюдается хорошая сходимость характера течения металла и формоизменения заготовок, полученных при моделировании и промышленном эксперименте. Доказано положительное влияние сдвиговой деформации на измельчение микроструктуры. Экспериментально подтверждено, что применение сдвиговой деформации способствует интенсификации ротационного механизма деформации, обеспечивает существенное измельчение зерна и увеличение твердости образцов.

10. Rifai M., Yuasa M., Miyamoto H. Enhanced corrosion resistance of ultrafine-grained Fe-Cr alloys with subcritical Cr contents for passivity // *Metals*. – 2018. – Vol. 8. – No. 3. – P. 149–159. DOI: 10.3390/met8030149.
11. Exceptionally high strength and good ductility in an ultrafine-grained 316L steel processed by severe plastic deformation and subsequent annealing / M. El-Tahawy, P.H.R. Pereira, Y. Huang, H. Park, H. Choe, T.G. Langdon, J. Gubicza // *Materials Letters*. – 2018. – Vol. 214. – P. 240–242.
12. Алиев И.С., Жбанков Я.Г., Периг А.В. Факторы, влияющие на параметрыковки крупных поковок // *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*. – 2013. – Т. 15, № 1. – С. 27–44.
13. Тюрин В.А. Механизм пластического деформирования с макросдвигами // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1998. – № 12. – С. 36–39.
14. Алиев И.С., Жбанков Я.Г., Периг А.В. Моделирование кузнечной протяжки в комбинированных бойках несимметричной формы // *Вестник НТУУ «КПИ». Сер. Машиностроение*. – 2013. – № 3 (69). – С. 77–83.
15. Тюрин В.А. Инновационные технологииковки с применением макросдвигов // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. – 2007. – № 11. – С. 15–20.
16. Марков О. Новые технологические процессы свободнойковки // *Новые технологии и достижения в металлургии и материаловедении*. – Польша, Ченстохова: Quick-druk, 2012. – С. 414–418.
17. Кухарь В.В., Василевский О.В. Экспериментальные исследования режимов кузнечной протяжки заготовок с обкаткой в комбинированных бойках // *Вестник НТУ «ХПИ»* – 2013. – № 43 (1016). – С. 139–148.
18. Алиева Л.И., Жбанков Я.Г., Станков В.Ю. Ковка поковок типа валов с продольным сдвигом специальными бойками // *Вестник НТУ «ХПИ»*. – 2013. – № 43 (1016). – С. 3–10.
19. Устройство для протяжки заготовок с закручиванием: пат. SU 1593773 / Петунин А.Ю., Поддубный К.В., Скащенков А.В., опубл. 23.09.90. Бюл. 35 (72).
20. Численное моделирование методом конечных элементов НДС заготовки при протяжке в инструменте с цилиндрической рабочей формой / С.А. Машеков, А.Е. Нуртазаев, Н.Т. Биякаева, А.Е. Удербасва // *Вестник КазНТУ*. – 2009. – № 4 (74). – С. 79–84.
21. Машеков С.А., Нуртазаев А.Е., Удербасва А.Е. Численное моделирование методом конечных элементов // *Вестник КазНТУ*. – 2010. – № 1 (77). – С. 79–83.

22. Машеков С.А., Нуртазаев А.Е., Удербаяева А.Е. Численное моделирование методом конечных элементов НДС заготовки при деформировании в специальном устройстве (сообщение 2) // Вестник КазНТУ. – 2010. – № 2 (78). – С. 108–112.

23. Численное моделирование методом конечных элементов НДС заготовки при деформировании в специальном устройстве (сообщение 3) / С.А. Машеков, А.Е. Нуртазаев, А.Е. Удербаяева, А.С. Машекова // Вестник КазНТУ. – 2010. – № 4(80). – С. 201–205.

24. Каргин С.Б. Инновационные технологииковки крупных поковок // Вестн. нац. техн. ун-та Украины «Киевский политехнический институт». Сер. Машиностроение. – 2010. – № 60. – С. 165–168.

25. Каргин С.Б. Инновационные технологииковки крупных поковок // Обработка материалов давлением. – 2012. – № 2(31). – С. 101–106.

26. Мулюков Р.Р., Имаев Р.М., Назаров А.А. Принципы получения ультрамелкозернистых материалов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2013. – № 4–1 (182). – С. 190–203.

27. Повышение прочности аустенитной стали комбинированным нагружением / М.В. Караваева [и др.] // Письма о материалах. – 2017. – № 7 (1). – С. 29–33.

28. Исламгалиев Р.К. Структура и свойства ультрамелкозернистой мартенситной стали // Вестник УКАТУ. – 2016. – № 3 (20). – С. 19–24.

29. Применение метода деформационного наноструктурирования в технологических процессах производства проволоки / М.В. Чукин [и др.] // Технология машиностроения. – 2013. – № 4. – С. 5–9.

30. Improvement of mechanical and electrical properties of rotary swaged Al-Cu clad composites / R. Kocich, L. Kunčická, A. Macháčková, M. Šofer // Materials & Design. – 2017. – Vol. 123. – P. 137–146.

31. Формирование ультрамелкозернистой структуры углеродистой стали в процессах горячей пластической деформации / О.А. Никитенко, Ю.Ю. Ефимова, М.С. Жеребцов, Н.В. Копцева, М.П. Барышников, Е.С. Селиванова // Вестник ПНИПУ. – 2015. – № 1 (17). – С. 31–41.

32. Полякова М.А., Гулин А.Е. Использование комбинирования различных видов пластической деформации для получения ультрамелкозернистой структуры в углеродистой проволоке // Изв. ТулГУ. Технические науки. – 2014. – Вып. 10. – Ч. 2. – С. 143–150.

33. Галкин С.П. Технология и мини-станы радиально-сдвиговой прокатки – оптимальная техника для создания безрежливой заготовки // Сталь. – 2014. – № 1. – С. 39–42.

34. Бешта А.С., Бойко О.А., Куваева Т.В. Система рациональных технико-экономических показателей при производ-

стве мелкозернистого мерного проката в стержнях // Электротехнические комплексы и системы автоматизации. – 2014. – С. 183–188.

35. Закарлюкин С.И., Закарлюкина Е.А., Коваль Г.И. Технологический комплекс производства сплошных и полых поковок постоянного и переменного по длине сечения из специальных металлов и сплавов // Вестн. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. Металлургия. – 2014. – Т. 14, № 1. – С. 73–79.

36. Macháčková A., Andreyachshenko V., Klečková Z. Modeling of forming technologies based on SPD processes. – LAP LAMBERT Academic Publishing. – 2015-07-13. – P. 124. – URL: <http://www.lap-publishing.com/>

37. Трошин А.Н. Идентификация параметров математической модели в процессах обработки материалов давлением // Кузнечно-штамповочное производство: перспективы и развитие: материалы 1-й Рос. конф. по кузнечно-штамповочному производству «Кузнецы Урала». – Екатеринбург, 2005. – С. 271–280.

38. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением: учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. техн. ун-та; УПИ, 2001. – 836 с.

39. Бердин В.К., Смоляков А.А. Численное моделирование интенсивного пластического деформирования меди равноканальным угловым прессованием // Кузнечно-штамповочное производство: перспективы и развитие: материалы 1-й Рос. конф. по кузнечно-штамповочному производству «Кузнецы Урала». – Екатеринбург, 2005. – С. 140–147.

40. Kocich R., Macháčková A., Andreyachshenko V.A. A study of plastic deformation behaviour of Ti alloy during equal channel angular pressing with partial back pressure // Computational Materials Science. – 2015. – Vol. 101. – P. 233–241.

41. Tool for realization several plastic deformation / A.B. Naizabekov [et al.] // 22th International Conference on metallurgy and materials METAL. – Czech Republic, Brno, 2013. – P. 45–49.

42. Andreyachshenko V.A., Ibatov M.K., Issagulova D.A. Initial porosity impact on equal channel angular pressing (ECAP) of Ti–6Al–4V powder material // Metalurgija. – 2016. – Vol. 55. – No. 4. – P. 775–778.

43. Andreyachshenko V.A. Finite element simulation (FES) of the fullering in device with movable elements // Metalurgija. – 2016. – Vol. 55. – No. 4. – P. 829–831.

44. Andreyachshenko V., Kocich R. Simulation of fullering technology as a plastic deformation method for high quality forgings production // Proc. METAL. – Czech Republic, Brno, 2015. – P. 175–179.

45. Naizabekov A.B., Andreyachshenko V.A., Kocich R. Study of deformation behavior, structure and mechanical properties of the AlSiMnFe alloy during ECAP-PBP // Micron. – 2013. – Vol. 44. – P. 210–217.

References

1. Citeau, A., Guicheux, J., Vinatier, C., Layrolle, P., Nguyen, T.P., Pilet, P., Daculsi, G. In vitro biological effects of titanium rough surface obtained by calcium phosphate grid blasting. *Biomaterials*, 2005, vol. 26, iss. 2, pp. 157–165. ISSN 0142-9612.

2. Jarmar, T., Palmquist, A., Branemark, R., Hermansson, L., Engqvist, H., Thomsen, P. Characterization of the surface properties of commercially available dental implants using scanning electron microscopy, focused ion beam, and high-resolution transmission electron microscopy. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, 2008, vol. 10, iss. 1, pp. 11–22. ISSN 1708-8208.

3. Dobatkin S.V., Lukyanova E.A., Martynenko N.S., Anisimova N.Y., Kiselevskiy M.V., Gorshenkov M.V., Salishchev G.A. Strength, corrosion resistance, and biocompatibility of ultrafine-grained Mg alloys after different modes of severe plastic deformation, *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 194, no. 1, 012004. pp. 1–8. DOI: 10.1088/1757-899X/194/1/012004.

4. Edalati, K., Masuda, T., Arita, M., Furui, M., Sauvage, X., Horita, Z., Valiev, R.Z. Room-temperature superplasticity in an ultrafine-grained magnesium alloy. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7(1), no. 2662, pp. 1–9. DOI: 10.1038/s41598-017-02846-2.

5. Kim, D., Won, J. W., Park, C.H., Hong, J.K., Lee, T., Lee, C.S. Enhancing superplasticity of ultrafine-grained Ti-6Al-4V without imposing severe plastic deformation. *Advanced Engineering Materials*, 2018, 1800115. DOI.org/10.1002/adem.201800115.
6. Bruder E., Gangaraju C., Lapovok R. Influence of equal channel angular pressing on high cycle fatigue behavior of ultrafine-grained iron: Role of anisotropy. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, vol. 711, pp. 650-658.
7. Raab A.G., Bobruk E.V., Raab G.I. Ultrafine-grained pure Ti processed by new SPD scheme combining drawing with Shear. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2018, vol. 27, no. 5, pp. 2414-2420.
8. Wang, Q., Mu, Y., Lin, J., Zhang, L., Roven, H.J. Strengthening and toughening mechanisms of an ultrafine grained Mg-Gd-Y-Zr alloy processed by cyclic extrusion and compression. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, vol. 699, pp. 26-30.
9. Wang, X., Ding, R., He, J., Zhao, A., Liu, R. Ultrafine-grained multiphase steels with different microstructural constitutions fabricated through annealing of tempered and deformed martensite. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2018, vol. 49(5), pp. 1439-1443.
10. Rifai M., Yuasa M., Miyamoto H. Enhanced corrosion resistance of ultrafine-grained Fe-Cr alloys with subcritical Cr contents for passivity. *Metals*, 2018, vol. 8, no. 3, pp. 149-159. DOI:10.3390/met8030149.
11. El-Tahawy, M., Pereira, P. H. R., Huang, Y., Park, H., Choe, H., Langdon, T.G., Gubicza, J. Exceptionally high strength and good ductility in an ultrafine-grained 316L steel processed by severe plastic deformation and subsequent annealing. *Materials Letters*, 2018, vol. 214, pp. 240-242.
12. Aliev I.S., Zhibankov Ia.G., Perig A.V. Faktory, vliiaushchie na parametry kovki krupnykh pokovok [Factors affecting the parameters of forging large forgings]. *Vestnik PNIPU «Mashinostroenie, materialovedenie»*, 2013, vol. 15, no. 1, pp. 27-44.
13. Tiurin V.A. Mekhanizm plasticheskogo deformirovaniia s makrosvivigami [Plastic shaping mechanism with macroshifts]. *Izvestiia vuzov. Chernaia metallurgii*, 1998, vol. 12, pp. 36-39.
14. Aliev I.S., Zhibankov Ia.G., Perig A.V. Modelirovanie kuznechnoi protiazhki v kombinirovannykh boikakh nesimmetrichnoi formy [Simulation of blacksmith broach in combined asymmetrical dies]. *Vestnik NTUU «KPI». Seriiia mashinostroenie*, 2013, no. 3 (69), pp. 77-83.
15. Tiurin V.A. Innovatsionnye tekhnologii kovki s primeneniem makrosvivigov [Innovative forged technology using macroshifts]. *Kuznechno-shiampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*, 2007, vol. 11, pp. 15-20.
16. Markov O. novye tekhnologicheskie protsessy svobodnoi kovki [New technological processes of free forging]. *novye tekhnologii i dostizheniia v metallurgii i materialovedenii*, Chentokhova: Quick-druk, Pol'sha, 2012, pp. 414-418.
17. Kukhar' V.V., Vasilevskii O.V. Eksperimental'nye issledovaniia rezhimov kuznechnoi protiazhki zagotovok s obkatkoi v kombinirovannykh boikakh [Experimental studies of the modes of blacksmith broach blanks with running in the combined dies]. *Vestnik NTU «XIII»*, 2013, vol. 43 (1016), pp. 139-148.
18. Alieva L.I., Zhibankov Ia.G., Stankov V.Iu. Kovka pokovok tipa valov s prodol'nym svivigom spetsial'nymi boikami [Forging forgings of the shaft type with a longitudinal shift by special dies]. *Vestnik NTU «XIII»*, 2013, vol. 43 (1016), pp. 3-10.
19. Petunin A.Iu., Poddubnyi K.V., Skashchenkov A.V. Ustroistvo dlia protiazhki zagotovok s zakruchivaniem [Device for pulling blanks with twisting], Patent SU 1593773. Opubl. 23.09.90, Biul. 35 (72).
20. Mashekov S.A., Nurtazaev A.E., Biiakaeva N.T., Uderbaeva A.E. Chislennoe modelirovanie metodom konechnykh elementov NDS zagotovki pri protiazhke v instrumente s tsilindricheskoi rabochei formoi [Numerical simulation by the method of finite elements of the SSS of the workpiece when drawing in a tool with a cylindrical working form]. *Vestnik KazNTU*, 2009, no. 4 (74), pp. 79-84.
21. Mashekov S.A., Nurtazaev A.E., Uderbaeva A.E. Chislennoe modelirovanie metodom konechnykh elementov [Numerical simulation by finite element method]. *Vestnik KazNTU*, 2010, no. 1 (77), pp.79-83.
22. Mashekov S.A., Nurtazaev A.E., Uderbaeva A.E. Chislennoe modelirovanie metodom konechnykh elementov NDS zagotovki pri deformirovanii v spetsial'nom ustroistve (soobshchenie 2) [Numerical simulation by the method of finite elements of the SSS of the workpiece during deformation in a special device (message 2)]. *Vestnik KazNTU*, 2010, no. 2 (78), pp. 108-112.
23. Mashekov S.A., Nurtazaev A.E., Uderbaeva A.E., Mashekova A.S. Chislennoe modelirovanie metodom konechnykh elementov NDS zagotovki pri deformirovanii v spetsial'nom ustroistve (soobshchenie 3) [Numerical simulation by the method of finite elements of the SSS of the workpiece during deformation in a special device (message 3)]. *Vestnik KazNTU*, 2010, no. 4(80), pp. 201-205.
24. Kargin S.B. Innovatsionnye tekhnologii kovki krupnykh pokovok [Innovative forging technology of large forgings]. *Vestnik natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta Ukrainy «Kievskii politekhnicheskii institut» Seriiia Mashinostroenie*, 2010, no. 60, pp. 165-168.
25. Kargin S.B. Innovatsionnye tekhnologii kovki krupnykh pokovok [Innovative forging technology of large forgings]. *Obrabotka materialov davleniem*, 2012, no. 2 (31), pp. 101-106.
26. Muliukov R.R., Imaev R.M., Nazarov A.A. Printsipy polucheniiia ul'tramelkozernistykh materialov [Principles of ultrafine-grained materials]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskie nauki*, 2013, no. 4-1 (182), pp. 190-203.
27. Karavaeva M.V. [i dr.] Povysenie prochnosti austenitnoi stali kombinirovannym nagruzheniem [Strengthening the strength of austenitic steel by combined loading]. *Pis'ma o materialakh*, 2017, no. 7 (1), pp. 29-33.
28. Islimgaliev R.K. Struktura i svoistva ul'tramelkozernistoi martensitnoi stali [Structure and properties of ultrafine martensitic steel]. *Vestnik UKATU*, 2016, no. 3 (20), pp. 19-24.
29. M.V. Chukin [i dr.] Primenenie metoda deformatsionnogo nanostrukturirovaniia v tekhnologicheskikh protsessakh proizvodstva provoloki [Application of the method of deformation nanostructuring in the technological process of wire production]. *Tekhnologiiia mashinostroeniia*, 2013, no. 4, pp. 5-9.
30. Kocich R., Kunčická L., Macháčková A., Šofer M. Improvement of mechanical and electrical properties of rotary swaged Al-Cu clad composites. *Materials & Design*, 2017, vol. 123, pp. 137-146.
31. Nikitenko O.A., Iu.Iu. Efimova, M.S. Zherebtsov, N.V. Koptseva, M.P. Baryshnikov, E.S. Selivanova Formirovanie ul'tramelkozernistoi struktury uglerodistoi stali v protsessakh goriachei plasticheskoi deformatsii [Formation of ultrafine-grained carbon steel structure in hot plastic deformation processes]. *Vestnik PNIPU*, 2015, no. 1 (17), pp. 31-41.
32. Poliakova M.A., Gulin A.E. Ispolzovanie kombinirovaniia razlichnykh vidov plasticheskoi deformatsii dlia polucheniiia ul'tramelkozernistoi struktury v uglerodistoi provoloke [The use of combining various types of plastic deformation to obtain an ultrafine-grained structure in a carbon wire]. *Izvestiia TulGU. Tekhnicheskie nauki*, 2014, vol. 10, iss.2, pp. 143-150.

33. Galkin S.P. Tekhnologiya i mini-stany radial'no-sdvigovoi prokatki – optimal'naya tekhnika dlia sozdaniia berezhlivogo proizvodstva [Radial-shear rolling technology and mini-mills are the optimal technique for creating lean manufacturing]. *Stal'*, 2014, no. 1, pp. 39-42.
34. Beshta A.S., Boiko O.A., Kuvaeva T.V. Sistema ratsional'nykh tekhniko-ekonomicheskikh pokazatelei pri proizvodstve melkosortnogo mernogo prokata v sterzhniakh [The system of rational technical and economic indicators in the production of small-sized dimensional steel in rods]. *Elektrotekhnicheskie komplekty i sistemy avtomatizatsii*, 2014, pp. 183-188.
35. Zakarliukin S.I., Zakarliukina E.A., Koval' G.I. Tekhnologicheskii kompleks proizvodstva sploshnykh i polykh pokovok postoiannogo i peremennogo po dline secheniia iz spetsial'nykh metallov i splavov [Technological complex for the production of solid and hollow forgings of constant and variable length of section from special metals and alloys]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya*, 2014, vol. 14, no. 1, pp. 73-79.
36. Macháčková, A., Andreyachshenko, V., Klečková, Z. Modeling of forming technologies based on SPD processes. Lap Lambert Academic Publishing, 2015, 124 p. <http://www.lap-publishing.com/>
37. Troshin A.N. Identifikatsiia parametrov matematicheskoi modeli v protsessakh obrabotki materialov davleniem [Identification of the parameters of the mathematical model in the processes of pressure treatment of materials]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo: perspektivy i razvitie. Materialy 1-oi Rossiiskoi konferentsii po kuznechno-shtampovochnomu proizvodstvu «Kuznetsy Urala»*, Ekaterinburg, 2005, pp. 271-280.
38. Kolmogorov V.L. Mekhanika obrabotki metallov davleniem: uchebnik dlia vuzov. 2-e izdanie pererabotannoe i dopolnennoe [Mechanics of metal forming: a textbook for high schools. 2nd edition revised and enlarged]. Ekaterinburg: Izd-vo Ural'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, UPI, 2001, 836 p.
39. Berdin V.K., Smoliakov A.A. Chislennoe modelirovanie intensivnogo plasticheskogo deformirovaniia medi ravnokanal'nym uglovym pressovaniem [Numerical simulation of intensive plastic deformation of copper by equal-channel angular pressing]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo: perspektivy i razvitie. Materialy 1-oi Rossiiskoi konferentsii po kuznechno-shtampovochnomu proizvodstvu «Kuznetsy Urala»*, Ekaterinburg, 2005, pp. 140-147.
40. Kocich R., Macháčková A., Andreyachshenko V.A. A study of plastic deformation behaviour of Ti alloy during equal channel angular pressing with partial back pressure. *Computational materials science*, 2015, vol. 101, pp. 233-241.
41. Naizabekov A.B. et al. Tool for realization several plastic deformation. *Proc. 22th International Conference on metallurgy and materials METAL*. Brno, Czech Republic, 2013, pp. 45-49.
42. Andreyachshenko V.A., Ibatov M.K., issagulova D.A. Initial porosity impact on equal channel angular pressing (ECAP) of Ti-6Al-4V powder material. *Metallurgija*, 2016, vol. 55, no. 4, pp. 775-778.
43. Andreyachshenko V.A. Finite element simulation (FES) of the fullering in device with movable elements. *Metallurgija*, 2016, vol. 55, no. 4, pp. 829-831.
44. Andreyachshenko V., Kocich R. Simulation of fullering technology as a plastic deformation method for high quality forgings production. *Proc. METAL*. Brno, 2015, pp. 175-179.
45. Naizabekov A.B., Andreyachshenko V.A., Kocich R. Study of deformation behavior, structure and mechanical properties of the AlSiMnFe alloy during ECAP-PBP. *Micron*, 2013, vol. 44, pp. 210-217.