

УДК 621.7

**В. Л. ЧУХЛЕБ, Е. С. КЛЕМШОВ, В. А. ГРИНКЕВИЧ, О. А. ЯРОШЕНКО, Т. А. ХАЛЕЗОВА, Х. ДЬЯ****ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ КОВКИ ПОКОВОК ГЛАДКИХ ВАЛОВ  
ИЗ ДУПЛЕКС-СТАЛИ В УСЛОВИЯХ ООО «ДНЕПРОПРЕСС СТАЛЬ»**

В статье выполнена оптимизация процессаковки дуплекс-стали путем математического моделирования схем протяжки по различным режимам с изменением схем кантовок и подач, а также определены показатели неравномерности распределения деформации по сечениям по разработанному авторами методу оценки неравномерности деформации по объему поковки с рассмотрением изменения этих величин, как в поперечном, так и в продольном направлениях. Для этого были промоделированы существующий и предложенный авторами способ протяжки поволовок гладких валов и путем достижения максимальной равномерности деформации и минимального искривления поковки в процессековки выбран наиболее оптимальный, который и был предложен для последующей автоматизации при ковке на гидравлическом ковочном прессе в условиях кузнечно-термического цеха ООО «Днепропресс Сталь».

**Ключевые слова:** ковка, дуплекс-сталь, протяжка, кантовка, распределение деформаций

У статті виконана оптимізація процесу кування дуплекс-сталі шляхом математичного моделювання схем ковальної витяжки (протяжки) по різних режимам зі зміною схем кантувань і подач, а також визначені показники нерівномірності розподілення деформацій по перетинах за розробленим авторами методом оцінки нерівномірності деформації в об'ємі металу поковки з розглядом зміни цих величин, як в поперечному, так і в поздовжньому напрямках. Для цього були промодельовані існуючий і запропонований авторами спосіб протяжки поволовок гладких валів і шляхом досягнення максимальної рівномірності деформації і мінімального викривлення поковки в процесі кування обрано найбільш оптимальний, який і був запропонований для подальшої автоматизації при куванні на гідрравлічному кувалльному пресі в умовах ковально-термічного цеху ТОВ «Дніпропрес Сталь».

**Ключові слова:** кування, дуплекс, протягування, кантування, розподілення деформацій

This article was made for optimization of forging the duplex steel by mathematical modeling of forging-drawing schemes with different modes of deformation and with the canting schemes and feeds changing, as well as defined the indicators of unevenness of strain distribution on the cross sections by the method of evaluation of unevenness of strain distribution inside the forgings with the consideration of this values as in transverse and longitudinal directions. This method is simple, but makes it possible to see what happens with the metal (particularly with a strain distribution) inside the forgings during the forging-drawing process. Also, this method was used firstly for needs of real manufacturing process, that was mathematically modulated in computer simulation software. For this matter were modeled real existing process of forging and proposed by authors process of forging-drawing of smooth shafts and through the achievement of maximal deformation unevenness and minimal curvature of the forging during the forging-drawing process selected the most optimal scheme of deformation, which was proposed for further automation of forging process on hydraulic forging press in terms of forging-thermal shop Ltd. "Dneproress Steel".

**Keywords:** forging, duplex, forging drawing, canting, strain distribution

**Введение.** Дуплекс-стали в последнее время все больше находят применение в различных областях машиностроения. Дуплекс-стали и способы их обработки давлением являются перспективными в области исследований, так как на качество получаемой продукции наибольшее влияние оказывает рациональный режимковки, который может быть спроектирован в зависимости от оптимизации схемы деформации путем математического моделирования с последующим их применением в реальных промышленных условиях.

**Постановка проблемы.** На сегодняшний день по всему миру предприятия по производству поволовок стремятся расширить свой сортамент, в частности за счет разработки режимов обработки новых, не исследованных сплавов или сплавов специального назначения. Такой метод расширения сортамента необходим, ввиду того что в мире всё больше развивается потребность в изделиях со специальным набором механических свойств. Сами же механические свойства определяются не только свойствами материала, но и способом обработки давлением. В данном случае, под способом обработки давлением понимается свободная ковка, а именно, кузнечная вытяжка (протяжка).

Дуплекс-стали относятся к классу высоколегированных сталей и требуют специального

режима деформации. Помимо точного соблюдения температурного интервалаковки для дуплекс-сталей, необходимо придерживаться и определённой схемы кантовок, а также не превышать допустимые степени деформации. Все эти параметры определяют качество изделия, а в частности механические свойства.

Поэтому, согласно вышесказанному, разработка оптимальных режимов деформации, при ковке поволовок гладких валов из дуплекс-сталей, для получения высокого качества продукции необходима.

**Анализ последних исследований и публикаций.** На данном этапе развития науки об обработке металлов давлением существует тенденция к постоянному усовершенствованию технологий получения металлопродукции. В кузнечном производстве, как и в любом другом способе обработки металлов давлением, существует два приоритетных направления:

- 1) усовершенствование формы деформирующего инструмента и заготовки;
- 2) оптимизация параметров для конкретных деформационных процессов.

К усовершенствованию формы деформирующего инструмента относится изменение формы бойков. В данном направлении существует

множество работ, в которых рассматривается влияние нестандартных форм бойков, отличных от классических плоских, вырезных или комбинированных, на напряженно-деформированное состояние поковки. Одной из таких работ является работа [1], в которой рассмотрено влияние геометрических параметров инструмента на деформированное состояние металла и дефектообразование. Авторы этой работы использовали ступенчатые бойки для более интенсивной проработки внутренних слоев металла заготовки. При этом ими было установлено, что велика вероятность образования внешних дефектов на поверхности круглой заготовки, поэтому необходимы малые обжатия в пределах 10–15%. Для устранения подобных дефектов на плоской заготовке авторами работы [1] предложены ступенчатые бойки с углом скоса 45°. Однако данный метод накладывает определённые трудности при составлении технологического процесса и соответственно увеличению времени производства поковок, что отражается на производительности, в особенности в условиях производства на предприятиях. Поэтому в данной работе форма инструмента не была изменена, а принята стандартная форма комбинированных бойков (верхний плоский и нижний вырезной) которая зачастую используется на предприятиях.

Как было сказано, при составлении технологического процесса производства поковки, на предприятии используются специальные схемы. Подобная схема приведена в работе [2]. Одним из пунктов данной схемы, помимо выбора формы и размеров бойков, является проектирование самого процесса деформации, то есть количества операцийковки и их параметры. К параметрам процессаковки длинномерных изделий относится степень деформации заготовки, величина подачи и схема кантовок заготовки. При этом ещё одним параметромковки, который выражается через схему кантовок, является наличие макросдвигов [3]. К данной области изучения пластической деформации металлов в последнее время имеется большой интерес, так как при небольших степенях деформации возможно получение минимальной анизотропии свойств металла как в продольном, так и в поперечном направлении. Так, например, существуют исследования по изучению влияния неравномерного прогрева заготовок для интенсификации сдвиговых деформаций. Одним из таких исследований является исследование в работе [4]. Таким образом, авторы работы [4], добиваются улучшения проработки центральной зоны заготовки за счет интенсивной сдвиговой деформации. Однако направленная неравномерность прогрева заготовки не рациональна при ковке дуплекс-сталей, ввиду слишком малого температурного интервалаковки, величина которого для дуплекс-сталей составляет около 120°C–150°C в зависимости от марки стали. Это связано с

образованием труднодеформируемых фаз сплава при превышении или выходе за пределы нижнего интервала ковочных температур.

Применение макросдвиговых деформаций обусловлено возможностью влияния на макроструктуру металла путем регулирования потоков пластического течения металла. В данном случае имеется ввиду оптимизация схемы кантовок, а точнее грамотное построение режима обжатий и кантовок на основе чередования зон деформации и суммировании эффектов, возникающих при пластическом вытеснении металла.

Как было сказано ранее, в мире все больше возникает потребность в металлопродукции со специальным набором механических свойств, которые, от части, обеспечиваются легированием стали. Так же известно, что легированные марки стали требуют специального деформационного режима, во избежание образования дефектов как внешних, так и внутренних. Для этого разрабатываются специальные технологические процессыковки, в которых важную роль играют чередующиеся обжатия и кантовок.

**Постановка задачи.** Главной целью данной работы является оптимизация технологического процессаковки поковок гладких валов из дуплекс-стали в условиях предприятия ООО «Днепропресс Сталь». На предприятии освоены более 100 марок сталей и сплавов. При этом вопросу обеспечению качественной продукцией своих потребителей уделяется первостепенное значение. В связи с этим в кузнечно-термическом цехе ООО «Днепропресс Сталь» внедряются новые и совершенствуются существующие технологические процессыковки слитков на гидравлических ковочных прессах.

Одной из задач, стоящих перед ООО «Днепропресс Сталь» является освоениековки дуплекс-сталей. Однако для получения качественной продукции необходимо знание напряженно-деформированного состояния в процессековки и формирование предложений по оптимизации режима деформации. Для моделирования процесса свободнойковки в Forge 2008® были заданы параметры реального процессаковки поковок из дуплекс-стали S32304 (сталь 03X23H4AM), а так же заданы параметры переходовковки, ранее разработанные в работах [5,6].

Исходной заготовкой дляковки является слиток (см. рис. 1) с донной частью 450x450 мм, прибыльной частью 580x580 мм и общей длиной 1500 мм. Конечным изделием является гладкий вал диаметром 320 мм.

Оптимальный температурный интервалковки для данного сплава составляет 1160–1040°C. При моделировании используются комбинированные бойки – верхний плоский, а нижний вырезной. Развал выреза нижнего бойка составляет 450 мм, а глубина выреза – 160 мм.

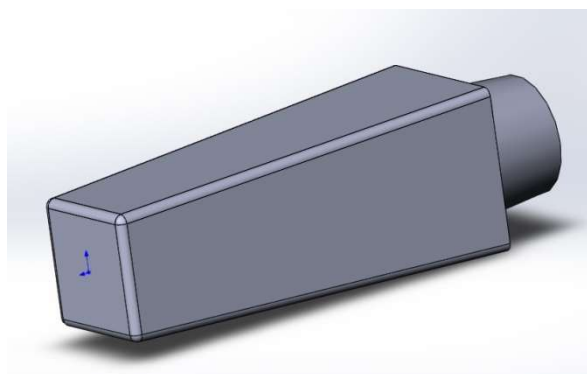


Рис. 1 – Объемная модель слитка из дуплекс-стали

Для моделирования процесса было задано две схемы кантовок: 1) реальная схема кантовок, используемая на предприятии (схема 1); 2) схема кантовок, разработанная авторами данной работы (схема 2). Схема кантовок, разработанная авторами данной работы, также представлена в работах [5, 6], и является схемой ковки «по кольцу» и состоит из 15 обжатий. В данной схеме после первого обжатия

следует кантовка на  $120^\circ$ , после этого заготовка снова обжимается и кантуется на  $120^\circ$ , затем следуют три обжатия и кантовки на  $60^\circ$  и после этого следуют 10 обжатий и кантовок на  $15^\circ$ . Относительная подача при этом составляет 0,5 от ширины бойка. Форма заготовок в процессе деформации приведена на рис. 2.

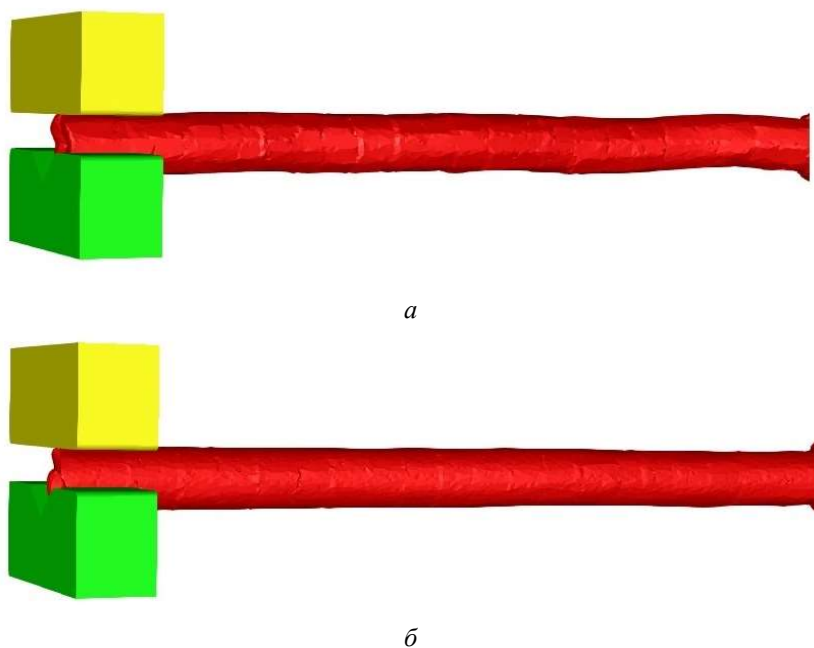


Рис. 2 – Форма заготовки в процессе ковки: а – при ковке по схеме 1; б – при ковке по схеме 2

Схема кантовок, используемая на предприятии, не имеет точно определенной последовательности углов кантовок. Углы кантовок также отличаются друг от друга при каждом обжатии. Величина угла при каждом обжатии варьируется в пределах от  $25^\circ$  до  $50^\circ$ . При этом схема кантовок состоит из шести обжатий, после чего производится три обжатия с

подачей заготовки и кантовкой её на угол из вышеописанного интервала. Величина относительной подачи при этом составляет 0,3 от ширины бойка. Степень деформации при обжатиях, при использовании обеих схем кантовок, составляет 10%

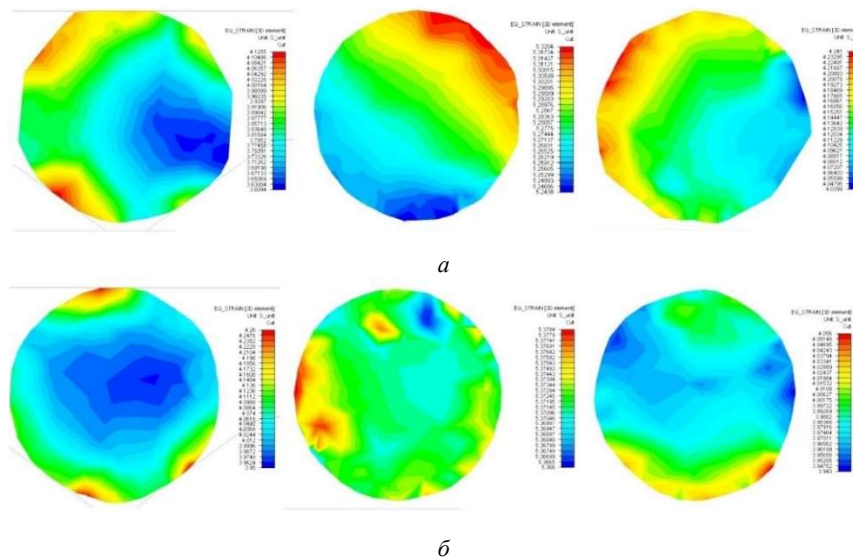


Рис. 3 – Распределение деформаций при протяжке (слева на право – передний конец, середина, задний конец).  
а – при ковке по схеме 1; б – при ковке по схеме 2

Анализ результатов моделирования был осуществлен с помощью трех поперечных сечений, два из которых расположены на концах поковки и одно на середине длины.

На рис. 3 представлено распределение деформаций в поперечных сечениях поковки при ковке по схеме 1 (см. рис. 3, а) и по схеме 2 (см. рис. 3, б).

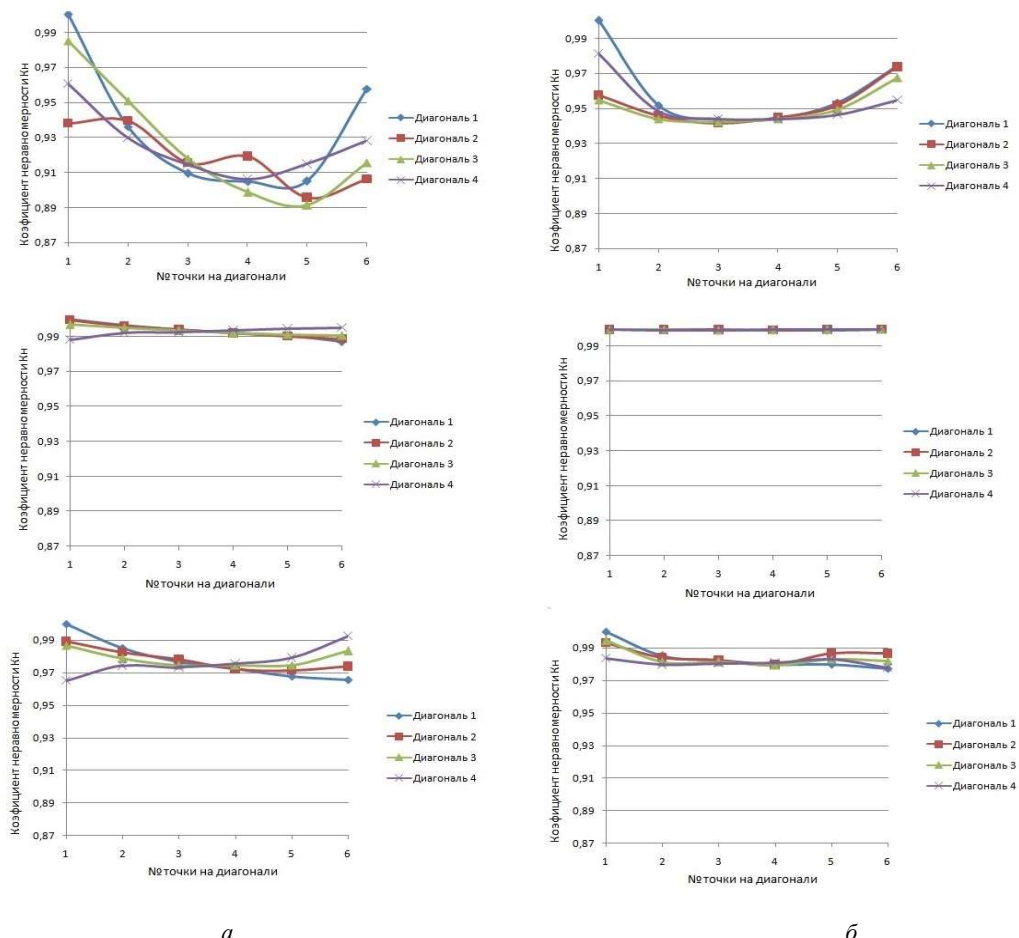


Рис. 4 – Распределение неравномерности деформации в поперечных сечениях (сверху вниз – передний конец, середина, задний конец) заготовки: а – при ковке по схеме 1; б – при ковке по схеме 2

Смысл метода определения неравномерности деформации заключается в определении как можно меньшей разницы показателей деформации в сечении. Сам же метод позволяет количественно оценить неравномерность распределения деформаций в металле. Для количественного определения неравномерности деформаций был рассчитан коэффициент неравномерности деформации  $K_n$ . Показатель неравномерности деформации может принимать значения не больше единицы, так как является отношением показателей эквивалентной деформации в контрольных точках сечения к максимальному значению эквивалентной деформации в сечении. Определение максимального значения деформации в сечении и соответствующих соотношений было рассмотрено в работах [5, 6].

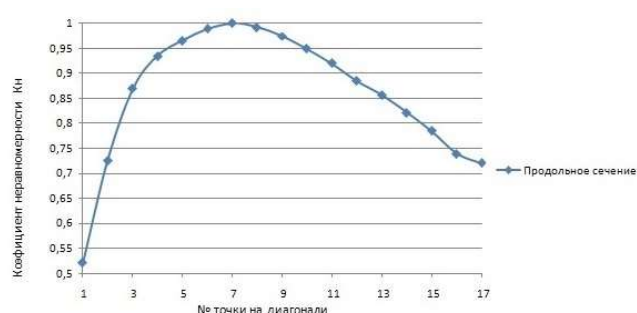
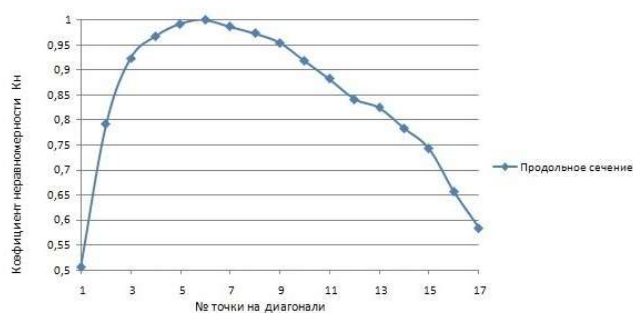


Рис. 5 – Распределение неравномерности деформации в продольном сечении заготовки:  
а – при ковке по схеме 1; б – при ковке по схеме 2

Из анализа графиков неравномерности распределения деформаций в продольных сечениях видно, что несмотря на различия в параметрах схем кантовок, величина коэффициента неравномерности распределения деформаций является практически идентичной как при ковке по схеме, разработанной авторами данной работы, так и при ковке по реально используемой на предприятии схеме кантовок.

#### Выводы проведенного исследования.

1) Параметры схем кантовок напрямую влияют на равномерность распределения деформаций в металле, что в свою очередь отражается на анизотропии механических свойств поковки.

2) В условиях ООО «Днепропресс Сталь» имеются все необходимые возможности для производства слитков и последующейковки дуплекс-стали.

3) Исходя из анализа результатов моделирования, можно заметить, что неравномерность распределения деформаций в продольном сечении поковки, несмотря на различия параметров схем кантовок, практически не отличаются, что свидетельствует об эффективности разработанной авторами статьи схемы кантовок.

4) Предложенная авторами схема кантовок обеспечивает меньшую неравномерность распределения деформаций, что видно на рис. 4. Это

Детальный анализ неравномерности распределения деформаций в металле был проведен с помощью построения графиков (рис. 4). На графиках изображены показатели неравномерности распределения деформации в трех сечениях.

Как видим, при ковке по схеме разработанной авторами работы заметна большая равномерность распределения деформаций, что видно по меньшему разбросу величин в сечении (кривизна линий), а также по минимальной величине коэффициента неравномерности распределения деформации.

В продольном сечении было взято 17 точек расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга. Значение показателя неравномерности в точках приведены на рис. 5.

связанно с рациональностью предложенной схемы и также со строгим соблюдением очередности обжатий, величин угла кантовки и подачи.

5) Указанные разработки приняты к рассмотрению и внедрению на ООО «Днепропресс Сталь» с последующей автоматизацией свободнойковки дуплекс-сталей в кузнечно-термическом цехе на гидравлических ковочных прессах.

#### Список литературы

1. Алиева Л.И. Ковка поковок типа валов с продольным сдвигом специальными бойками / Л.И. Алиева, Я.Г. Жбанков, В.Ю. Станков // Вестник НТУ «ХПИ». 2013. № 43 (1016). С/ 3–10.
2. Морозова С.А. Блок-схема проектирования технологии свободнойковки на прессах / С.А. Морозова, О.В. Жуйкова, В.Н. Неверов // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2002. №8–9. С. 467–471.
3. Тюрин В.А. Макросдвиг – союзник кузнеца / В.А. Тюрин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2016. №8. С/ 6–10.
4. Жбанков Я.Г. Интенсификация сдвиговых деформаций при ковке заготовок с неоднородным температурным полем / Я.Г. Жбанков // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2013. №2 (281). С. 42–47.
5. Чухліб В.Л. Дослідження напружено-деформованого стану при протяжці титанового сплаву з метою оптимізації параметрів кування / В.Л. Чухліб, Є.С. Клемешов, В.О. Гринкевич, Х. Дия // Вестник НТУ «ХПИ». 2015. №24. С. 15–166.
6. Чухліб В.Л. Дослідження впливу параметрів процесу попереднього осаджування на нерівномірність розподілення

деформацій в метали при протягуванні заготовок з титанового сплаву / В.Л. Чухліб, Є.С. Клемешов, В.О. Гринкевич, Х. Дія // Вісник НТУ «ХПІ». 2016. №1 (76). С. 147–155.

**References (transliterated)**

1. Alieva L.I. Kovka pokovok tipa valov s prodol'nym sdvigom special'nymi bojkami / L.I. Alieva, Ja.G. Zhbankov, V.Ju. Stankov // Vestnik NTU «ХПІ». 2013. No 43 (1016). P. 3–10.
2. Morozova S.A. Blok-shema proektirovanija tehnologii svobodnoj kovki na pressah / S.A. Morozova, O.V. Zhujkova, V.N. Neverov // Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost'. 2002. No 8–9. P. 467–471.
3. Tjurin V.A. Makrosdvig – sojuznik kuzneca / V.A. Tjurin // Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo. Obrabotka metallov davleniem. 2016. No 8. P. 6–10.
4. Zhbankov Ja.G. Intensifikacija sdvigojvyh deformacij pri kovke zagotovok s neodnorodnym temperaturnym polem / Ja.G. Zhbankov // Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost'. 2013. No 2 (281). P. 42 – 47.
5. Chuhlib V.L. Doslidzhennja napruzhenno-deformovanogo stanu pri protjazhki titanovogo splavu z metoju optimizacii parametriv kuvannja / V.L. Chuhlib, Ye.S. Klemeshov, V.O. Grinkevich, H. Dija // Vestnik NTU «ХПІ». 2015. No 24. P. 159-166.
6. Chuhlib V.L. Doslidzhennja vplivu parametriv procesu poperedn'ogo osadzhuvannja na nerivnomirnist' rozpodilennja deformacij v metali pri protjaguvanni zagotovok z titanovogo splavu / V.L. Chuhlib, Ye.S. S. Klemeshov, V.O. Grinkevich, H. Dija // Visnik NTUU «ХПІ». 2016. No 1 (76).P. 147–155

Поступила (received) 15.11.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Оптимізація технології кування поковок гладких валів з дуплекс-сталей в умовах ТОВ «Дніпропрес Сталь»/ В.Л. Чухліб, Є.С. Клемешов, В.О. Гринкевич, О.О. Ярошенко, Т.А. Халезова, Х. Дія // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 31(1203). – С. 75–81. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2519-2671**

**Оптимизация технологииковки поковок гладких валов из дуплекс-сталей в условиях ООО «Днепропресс Сталь»/ В.Л. Чухлеб, Е.С. Клемешов, В.А. Гринкевич, О.А. Ярошенко, Т.А. Халезова, Х. Дия // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 31(1203). – С. 75–81. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2519-2671**

**Optimization of technology of forging of shafts from duplex steels in terms of Ltd. “Dnepropress Steel”/ V.L. Chuhlib, Y.S. Klemeshov, V.A. Grinkevich, O.A. Yaroshenko, T.A. Khalezova, H. Dija // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 31(1203). – P. 75–81. – Bibliogr.: 6 – ISSN 2519-2671**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Чухлеб Виталий Леонидович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры обработки металлов давлением им. акад. Чекаррева А.П., г. Днепропетровск; тел.: (095) 792-55-92; e-mail: cvl1@mail.ua.

**Чухліб Віталій Леонідович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри обробки металів тиском ім. акад. Чекаррьова О.П., м. Дніпропетровськ; тел.: (095) 792-55-92; e-mail: cvl1@mail.ua.

**Chukhlib Vitaliy Leonidovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Metallurgical Academy of Ukraine, Associate Professor at the Department of Metal Forming; tel.: (095) 792-55-92; e-mail: cvl@mail.ru.

**Клемешов Евгений Сергеевич** – аспирант кафедры обработки металлов давлением им. акад. Чекаррева А.П., г. Днепропетровск; e-mail: klemeshov.evgen@gmail.com.

**Клемешов Євген Сергійович** – аспірант кафедри обробки металів тиском ім. акад. Чекаррьова О.П., м. Дніпропетровськ; e-mail: klemeshov.evgen@gmail.com.

**Klemeshov Yevhen Sergijovich** – Ph.D. student, National Metallurgical Academy of Ukraine, Associate Professor at the Department of Metal Forming; e-mail: klemeshov.evgen@gmail.com.

**Гринкевич Владимир Александрович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры обработки металлов давлением им. акад. Чекаррева А.П., г. Днепропетровск.

**Гринкевич Володимир Олександрович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри обробки металів тиском ім. акад. Чекаррьова О.П., м. Дніпропетровськ.

**Grinkevich Volodymyr Oleksandrovych** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Metallurgical Academy of Ukraine, Professor at the Department of Metal Forming.

**Ярошенко Олег Александрович** – директор по производству ООО «Днепропресс Сталь», г. Днепропетровск.

**Ярошенко Олег Олександрович** – директор з виробництва ТОВ «Дніпропрес Сталь», м. Дніпропетровськ.

**Yaroshenko Oleg Oleksandrovych** – production Director of Joint Stock Company "Dnepropress Steel", Dnipropetrovsk.

**Халезова Татяна Адольфовна** – начальник – кузнечно-пресового бюро ООО «Днепропресс Сталь», г. Днепропетровск.

**Халезова Тетяна Адольфівна** – начальник ковальсько-пресового бюро ТОВ «Дніпропрес Сталь», м. Дніпропетровськ.

**Khalezova Tatyana Adolfovna** – Head of press-forging Bureau of Joint Stock Company "Dnepropress Steel", Dnipropetrovsk.

**Дья Хенрик** – доктор технических наук, профессор, профессор Политехники Ченстохова, г. Ченстохова, Польша.

**Дия Хенрик** – доктор технічних наук, професор, професор Політехники Ченстохової, м. Ченстохова, Польша.

**Dyja Henrik** – Doctor of Science in Engineering, Full professor; Polytechnic of Chensochowa, Professor at the Department of Material Engineering.