

УДК 621.701.579

**Драгобецкий В. В.**  
**Шаповал А. А.**  
**Мосъпан Д. В.**

## **УПРАВЛЯЕМЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ**

Одной из важнейших задач производства деталей методами пластического деформирования является с одной стороны повышение их качества и эксплуатационных характеристик, с другой – увеличение степени деформации материала заготовки. Высокие эксплуатационные свойства деталей, формирующиеся в производственно-технологических циклах формоизменения и термообработки, достигаются путем интенсификации процессов пластического деформирования, совмещения операций, использования особенностей пластического течения в условиях неравномерного деформирования. Эти особенности включают эффекты пластической деформации, а именно, эффекты дополнительного силового и кинематического воздействия на очаг деформации и сдвиговые эффекты пластического течения. Эти направления значительно эффективнее методов расширения технологических возможностей обработки металлов давлением, связанных с оптимизацией свойств смазочных материалов, формы заготовки и инструмента; использованием ультразвуковых колебаний и высокоскоростного нагружения и др. Дополнительное воздействие на деформируемый металл в очаге деформации позволяет реализовать совмещение технологических операций пластического формоизменения при наложении дополнительных усилий и моментов. Дополнительное силовое и термическое воздействие на промежуточных операциях термопластической обработки при определенных сочетаниях режимов и последовательности этих воздействий обеспечивают получение необходимых механических, технологических и эксплуатационных свойств заготовок и деталей. Основные принципы совмещения формоизменяющих операций в одном штамповом переходе были разработаны Е. А. Поповым [1]. Значительный вклад в развитие и разработку совмещенных операций внесли труды Ю. А. Аверкиева, А. Ф. Ахметова, М. Н. Горбунова, В. И. Ершова, Е. И. Исаченкова, В. Л. Калюжного, М. И. Лысова, В. А. Огородникова, В. И. Стеблюка, Р. В. Пихшовникова и др. [2–5].

Целью работы является разработка системы классификации управляемых эффектов пластического течения для решения комплекса технико-экономических проблем и создание новых принципов совмещения операций в одном переходе и комбинированных технологий. Поиск эффективных методов управления процессами пластического деформирования и создание технологических множеств силового и кинематического воздействия на заготовку и сдвиговых эффектов пластического течения значительно облегчается разработкой системы классификации этих эффектов. Кроме того, классификация способствует выявлению новых процессов и уточнению технологических возможностей используемых методов обработки. Под классификацией в теории образов понимают разбиение некоторой совокупности объектов на группы объектов, близких в каком-то смысле. Деление на более мелкие подмножества, включающие материал заготовок и их геометрические параметры, приведены в работах [1, 2, 6]. Разработка классификатора позволяет систематизировать данные для разработки математической модели процессов формоизменения в условиях дополнительного силового и кинематического воздействия, изыскать новые наиболее эффективные и совершенные способы и приемы повышения пластичности.

Эффекты пластической деформации могут являться структурным элементом окончательно не разработанного классификатора способов повышения пластичности и классификатора эффектов, возникающих при пластической деформации. В отдельный структурный элемент классификаторов можно вынести эффекты пластической деформации, приводящие к снижению деформирующих усилий и структурным изменениям обрабатываемого материала. Это:

- остаточные напряжения и эффект Баушингера;
- влияние температуры и скорости деформации;
- деформационная анизотропия;
- вибропластичность, сверхпластичность, электропластичность;
- аномально высокая пластичность;
- микролокализация деформации;
- дополнительное силовое и кинематическое воздействие;
- сдвиговые эффекты.

Увеличение деформируемости при дополнительном совмещении нагружения достигается благодаря уменьшению деформаций в опасном сечении, снижению значений лимитирующих напряжений без изменения деформаций [3, 5], в результате повышения пластичности материала при изменении схемы напряженного состояния. Многочисленные экспериментальные исследования В. А. Огородникова и его учеников [3, 5] послужили предпосылкой для выявления управляемых эффектов пластического течения при формоизменении. Анализ диаграмм пластичности, выполненных по программам: растяжение –  $P$ , растяжение с наложением давления –  $P+q$ , кручение –  $M$ , кручение с наложением давления  $M+q$ , растяжение с кручением  $P+M$ , растяжение с кручением с наложением гидростатического давления –  $P+M+q$  позволяет сделать следующие выводы:

- с уменьшением показателя схемы напряженного состояния  $\eta$  (уменьшением шаровой части тензора напряжений) величины предельных деформаций  $\epsilon_p$  возрастают;
- изменение предельных деформации в зависимости от температуры для допустимого температурного интервала горячей деформации сравнимо с величиной  $\epsilon_p$  при показателе схемы напряженного состояния, приближающегося к нулю.

При  $\eta \rightarrow 0$ ,  $\epsilon_p \rightarrow \max$  действуют только касательные напряжения и максимально проявляются сдвиговые эффекты. Это приводит к существенному улучшению эксплуатационных и технологических свойств обработки материалов.

Теория дополнительных напряжений, доработанная Чигиринским В. В. [7], базируется на определенной физической модели процесса деформирования. Суть модели состоит в том, что скорости деформаций представлены в виде суммы значений, определяемых, с одной стороны пластическим формоизменением металла вдоль одной из координатных осей, а с другой – взаимодействием участков среды в соответствующих направлениях. Результирующее напряжение представляет сумму напряжений, которые связаны с определенным течением и взаимодействием смежных зон.

Учет влияния кинематики течения на напряженное состояние металла позволяет выявить варианты деформационного воздействия на технологические возможности производства тонкостенных профилей сниженной металлоемкости. Напряжения среза или дополнительные напряжения, изменяя характер воздействия на очаг деформации, изменяют процесс формоизменения металла. Появление знакопеременных по сечению профиля напряжений способствует усреднению продольной деформации по ширине полосы [7]. Это вносит достаточную определенность в решение многих задач обработки металлов давлением. В этой связи представляет интерес получение математической связи дополнительных напряжений и средней продольной скорости деформации.

Записывая уравнения равновесия для прокатки без смежных зон и с учетом взаимодействия с другими участками и, вычитая одно из другого, получим уравнение равновесия в приращениях напряжений. В результате можно записать уравнения равновесия в приращениях.

Допускается, что касательные напряжения, вызванные силами трения в продольном и в поперечном направлении, при взаимодействии между элементами не изменяются. Вследствие этого их разницей можно, в определенных пределах, пренебречь. Эти допущения позволяют объемную задачу свести к плоской.

Наиболее эффективными методами определения напряженно-деформируемого состояния в условиях сложного нагружения являются экспериментально-расчетные методы. Достоинства и недостатки этих методов освещены в работах В. А. Огородникова [5]. Разработанный им экспериментально-расчетный метод позволяет определить напряженно-деформируемое состояние в установившихся и не установившихся процессах для материалов с различной упрочняемостью. При этом возможно рассчитывать и прогнозировать деформируемость заготовок, частицы материалов которых находятся в условиях простого и сложного деформирования, т.е.  $\eta = const$ ;  $\eta = f(e_p)$ , где  $\eta$  – показатель напряженного состояния;  $e_p$  – степень деформации.

Формоизменение с дополнительным нагружением относим к воздействиям, разделенным и совмещенным во времени и пространстве. В классификаторе можно выделить три вида дополнительного нагружения:

- совмещенные во времени, но в то же время разделенные в пространстве;
- совмещенные в пространстве, но дополнительное нагружение производится с определенным сдвигом во времени;
- совмещение как в производстве, так и во времени.

По функциональному назначению дополнительное нагружение применяется для:

- увеличения допустимой степени деформаций;
- уменьшения неравномерности деформаций по сечению детали;
- исключения искажения геометрии деформируемой заготовки;
- снижения энергоемкости процесса формоизменения и деформирующих усилий.

Это достигается путем:

- создания противодействия (жидкостью, эластичной средой, пластичным металлом);
- переменного нагружения заготовки вдоль образующих;
- использования реактивных составляющих деформирующих усилий;
- использования остаточных напряжений;
- использования динамической последовательности.

В зависимости от скорости изменения нагрузки во времени дополнительное воздействие различают:

- статическое и квазистатическое;
- динамическое (ударное, вибрационное, подвижное);
- импульсное (взрыв, гидроимпульс, магнито- и электроимпульсный лазер и т. д.).

Совмещенные операции формоизменения делим на два класса:

- формоизменяющие операции, в которых очаг деформации может быть разделен на отдельные зоны;
- операции, в которых кроме основной нагрузки к очагу деформаций приложены дополнительные силы и моменты.

В первом случае расчетные зависимости для совмещенных операций в одном переходе получают на основании зависимостей для однооперационных подходов. Однако в зонах сопряжения участков возникают эффекты, связанные с локализацией пластических деформаций и изменение показателя схемы напряженного состояния. До сих пор эти эффекты не исследованы и не учитываются.

Использование второго класса операций более предпочтительно в связи с тем, что им можно управлять. В этом случае более полно используются пластические свойства материала заготовки, т. к. в каждой зоне предельная степень деформации имеет большее значение, чем при раздельном выполнении операций.

Процессы обработки давлением, у которых на деформируемую часть заготовки действует определенное множество или совокупность внешних нагрузок условно разделяют на две группы [1]:

1. Процессы, в которых формоизменение осуществляется под действием единственной внешней нагрузки.

2. Процессы, в которых формоизменение осуществляется под действием внешних нагрузок нескольких видов.

Во втором случае нагрузки считаются независимыми, если нагружение заготовки одной из нагрузок не приводит к неизбежному возникновению другой нагрузки. Анализ процессов второй группы или совмещенных процессов возможен только путем интегрирования поля скоростей деформаций по времени, т.е. с учетом истории нагружения.

Существуют различные подходы к решению технологических задач пластического деформирования заготовок под действием нескольких независимых друг от друга нагрузок.

Один из них [1, 8, 9] основан на том, что итоговое поле скоростей деформаций представляется в виде некоторой совокупности полей скоростей деформаций, которые возникают под действием отдельных видов нагрузок, согласованных между собой. Сложное формоизменение раскладывается на ряд простых процессов. Затем производится анализ простых процессов каждого в отдельности. Далее путем объединения простых процессов получают синтезированный сложный процесс как сумму простых с учетом их взаимодействия.

В подходе М. Н. Лысова [1] деформированное состояние в процессе формоизменения при различной последовательности действия на деформируемую заготовку усилий и моментов определяется путем суммирования деформаций от действующих нагрузок. При этом учитывается изменение геометрии сечения заготовки и ее центра тяжести.

Силовые факторы процесса представляются с учетом комплексной формы поперечного сечения. Величина и распределение самоуравновешенных по сечению остаточных напряжений получается путем наложения на эпюру созданных в активной стадии напряжений.

Разработанный классификатор и его отдельные элементы представлены на рис. 1, 2, 3.

В условиях сложного нагружения процесс формоизменения связан с переходом от стационарного очага деформации к нестационарному. При нестационарном очаге деформации изменение лагранжевых координат элемента заготовки в процессе формоизменения сопровождается одновременным изменением очага деформации. Вследствие этого величина напряжений, которые действуют на элемент заготовки, практически не изменяется в процессе деформирования заготовки.

Дополнительное нагружение в процессе деформирования элементов заготовки приводит к тому, что последние перемещаются в стационарном очаге деформации. Заготовка и ее элементы испытывают действие меняющихся по величине напряжений. Течение металла в элементах заготовки в условиях дополнительного нагружения сопровождается значительным изменением величин напряжений, воздействующих на этот элемент и вызывающих его деформацию.

В условиях дополнительного нагружения течение металла в элементах заготовки и изменение его размеров характеризуется уравнением связи, дающими соотношение между напряжения и скоростями деформации (или приращениями деформаций). Это позволяет использовать условие совпадения главных осей напряжений и постоянства величин главных нормальных напряжений для немонотонных процессов деформирования при сложном нагружении. Это допустимо в связи с малостью промежутка времени и величины деформаций.

Учитывая то, что управляемые воздействия на процесс формоизменения связаны с силовой интенсификацией, более целесообразно уравнения равновесия (движения) представить в усилиях и моментах [8]. Внешние силы (деформирующие и дополнительные) сосредотачиваются в условиях (массовых) точках заготовки. Изгиб также концентрируется в точках расположения масс (точках приведения).

Поиск оптимальных условий реализации управляющих воздействий пластического формоизменения сопряжен со значительными математическими трудностями. Поэтому, целесообразно использование численных методов решения, таких как итерационные методы, метод поиска на сетке варьируемых параметров и другое. Наиболее эффективным является использование градиентных методов, например метода наискорейшего спуска.

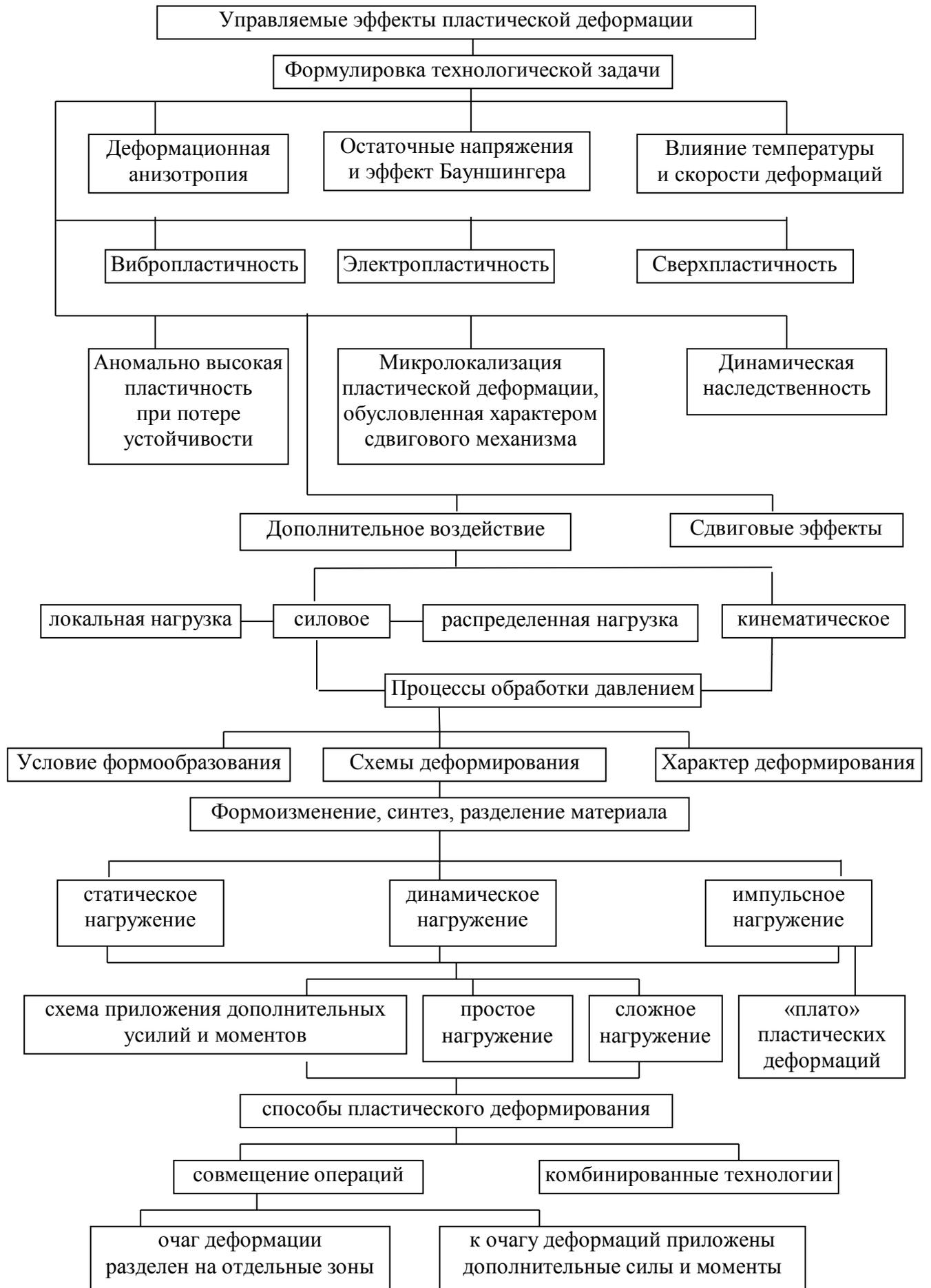


Рис. 1. Классификация эффектов пластической деформации



Рис. 2. Кинематические эффекты при пластической деформации



Рис. 3. Сдвиговые эффекты при пластической деформации

В перспективе классификацию управляемых эффектов пластического деформирования необходимо конкретизировать для процессов обработки давлением. При этом все применяемые в промышленности технологические процессы и еще неизвестные эффекты, методы и схемы желательно расположить в определенной системе, в той или иной степени соответствующей периодической системе.

### ВЫВОДЫ

Комплекс теоретических и технологических задач, которые определяют технологические возможности процессов обработки материалов пластическим деформированием, наиболее полно раскрывается на основе классификации управляемых эффектов пластической деформации. Но-

вые возможности для решения этих задач связаны с использованием дополнительных воздействий силовых и кинематических и реализации сдвиговых эффектов. Результатом реализации этих эффектов является решение комплекса технико-экономических проблем и создание новых принципов совмещения операций в одном переходе и комбинированных технологий.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ершов В. И. Совершенствование формоизменяющих операций листовой штамповки / В. И. Ершов, В. И. Глазков, М. В. Каширин. – М. : Машиностроение, 1990. – 312 с.
2. Исаченков Е. И. Контактное трение и смазка при обработке металлов давлением / Е. И. Исаченков. – М. : Машиностроение, 1978. – 208 с.
3. Дель Г. Д. Пластичность деформированного металла / Г. Д. Дель // Физика и техника высоких давлений. – 1983. – № 11. – С. 28–32.
4. Исаченков Е. И. Штамповка резиной и жидкостью / Е. И. Исаченков. – М. : Машиностроение, 1967. – 364 с.
5. Огородников В. А. Энергия. Деформация. Разрушение (задачи автотехнической экспертизы) : монография / В. А. Огородников, В. Б. Киселев, И. О. Сивак. – УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 195 с.
6. Импульсная обработка металлов давлением / Сб. статей под ред. В. К. Борисевича. – М. : Машиностроение, 1977. – 144 с.
7. Производство тонкостенного проката специального назначения / В. В. Чигиринский, Ю. С. Кресанов, А. Я. Качан, А. В. Богуслаев, Г. И. Леготкин, А. Г. Слепнин, Т. Г. Шевченко, Н. Х. Корецкий // Монография. – Запоріжжя : ВАЛПІС, 2014. – 296 с.
8. Zagirnyak M. New methods of obtaining materials and structures for light armor protection / M. Zagirnyak, V. Dragobetskyi // International Conference on Military Technologies (ICMT). – Brno : University of Defence, 2015. – P. 705–710. – IEEE Catalog Number CFP 154 ARW-USB. – ISBN 978-80-7231-976-3.
9. Дидык Р. П. Резонансный вибропластический эффект в обработке металлов давлением / Р. П. Дидык, Е. В. Кузнецов, Р. Ф. Балакин // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Том 5. Пластична деформація металів. – Дніпропетровськ : Системні технології, 2002. – С. 365–369.

#### REFERENCES

1. Ershov V. I. Sovershenstvovanie formoizmenjajushhijh operacij listovoj shtampovki / V. I. Ershov, V. I. Glazkov, M. V. Kashirin. – M. : Mashinostroenie, 1990. – 312 s.
2. Isachenkov E. I. Kontaktnoe trenie i smazka pri obrabotke metallov davleniem / E. I. Isachenkov. – M. : Mashinostroenie, 1978. – 208 s.
3. Del' G. D. Plastichnost' deformirovannogo metala / G. D. Del' // Fizika i tehnika vysokih davlenij. – 1983. – № 11. – S. 28–32.
4. Isachenkov E. I. Shtampovka rezinoj i zhidkost'ju / E. I. Isachenkov. – M. : Mashinostroenie, 1967. – 364 s.
5. Ogorodnikov V. A. Jenergija. Deformacija. Razrushenie (zadachi avtotehnicheskoj jekspertizy) : monografija / V. A. Ogorodnikov, V. B. Kiselev, I. O. Sivak. – UNIVERSUM-Vinnicja, 2005. – 195 s.
6. Impul'snaja obrabotka metallov davleniem / Sb. statej pod red. V. K. Borisevicha. – M. : Mashinostroenie, 1977. – 144 s.
7. Proizvodstvo tonkostennogo prokata special'nogo naznachenija / V. V. Chigirinskij, Ju. S. Kresanov, A. Ja. Kachan, A. V. Boguslaev, G. I. Legotkin, A. G. Slepynin, T. G. Shevchenko, N. H. Koreckij // Monografija. – Zaporizhzhja : VALPIS, 2014. – 296 s.
8. Zagirnyak M. New methods of obtaining materials and structures for light armor protection / M. Zagirnyak, V. Dragobetskyi // International Conference on Military Technologies (ICMT). – Brno : University of Defence, 2015. – P. 705–710. – IEEE Catalog Number CFP 154 ARW-USB. – ISBN 978-80-7231-976-3.
9. Didyk R. P. Rezonansnyj vibroplasticheskiy jeffekt v obrabotke metallov davleniem / R. P. Didyk, E. V. Kuznecov, R. F. Balakin // Suchasni problemi metalurgii. Naukovi visti. Tom 5. Plastichna deformacija metaliv. – Dnipropetrovs'k : Sistemni tehnologii, 2002. – S. 365–369.

Драгобецкий В. В. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. ТМ КНУ им. М. Остроградского;  
Шаповал А. А. – канд. техн. наук, докторант каф. ТМ КНУ им. М. Остроградского;  
Мосьпан Д. В. – канд. техн. наук, докторант каф. ТМ КНУ им. М. Остроградского.

КНУ им. М. Остроградского – Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, г. Кременчуг;  
ЗНТУ – Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье.

E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Статья поступила в редакцию 24.09.2015 г.