УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ РАЗДЕЛИТЕЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА КУЗНЕЧНО-ПРЕССОВЫХ АГРЕГАТОВ

*А. Н. СМІРНОВ¹, д-р техн. наук, ведучий научный сотрудник, stalevoz@i.ua;
О. А. КОВАЛЕНКО², начальник отдела лицензирования, аккредитации и сертификации;
С. В. КУБЕРСКИЙ², канд. техн. наук, проректор по научной работе;
Е. Е. БИЗЯНОВ², д-р экон. наук, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры
“Специализированные компьютерные системы”;
Н. В. КОВАЛЕНКО², д-р экон. наук, профессор, заведующий кафедрой экономики и управления
(¹ Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Украина, г. Киев;
² Донбасский государственный технический университет, Украина, г. Алчевск)*

Аннотация. Исследование динамики взаимодействия штампового инструмента с окружающей средой, расширение его технологических возможностей и увеличение срока эксплуатации является важной и актуальной научно-практической задачей. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния конструкции штампового инструмента на его напряженно-деформированное состояние (НДС) и стойкость. Осуществлена оценка НДС и его распределения по глубине упрочненного слоя на режущих кромках инструмента. Предложена новая форма пуансона, упрочнение его режущих кромок с использованием метода электроискрового легирования (ЭИЛ) ванадием и технологические режимы нанесения покрытия, обеспечивающие повышение срока эксплуатации штампов. Выполнено исследование фазового состава и глубины слоя после ЭИЛ. Рассмотрены преимущества упрочненного методом ЭИЛ ванадием штампового инструмента с точки зрения величины и распределения напряжений, микротвердости и глубины упрочненного слоя. Показано влияние этих преимуществ на увеличение технологического ресурса оборудования, снижение удельных материальных и энергетических затрат, повышение качества продукции и производительности технологических агрегатов. Предложено в ходе дальнейших исследований оценить влияние шероховатости поверхности пуансона на твердость получаемого методом ЭИЛ упрочненного слоя и областей, примыкающих к нему, определить оптимальную толщину покрытия, а также влияние на рассматриваемые процессы толщины деформируемого материала.

Ключевые слова: разделительные штампы, напряженно-деформированное состояние, упрочнение режущих кромок, электроискровое легирование.

Ссылка для цитирования. Смирнов А.Н., Коваленко О.А., Куберский С.В., Бизянов Е.Е., Коваленко Н.В. Усовершенствование конструкции разделительного инструмента кузнечно-прессовых агрегатов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 12. С. 89–96.

Doi: 10.32339/0135-5910-2018-12-89-96

PERFECTION OF THE DESIGN OF PRESS-FORGING AGGREGATES SHEARING INSTRUMENT

*A. N. SMIRNOV¹, HD (Tech), leading research assistant, stalevoz@i.ua;
O. A. KOVALENKO², Head of Dpt on licensing, accreditation and certification;
S. V. KUBERSKIY², PhD (Tech), Pro-rector on science;
E. E. BIZYANOV², HD (Econ), PhD (Tech), Professor, Dpt “Specialized computer systems”;
N. V. KOVALENKO², HD (Econ), Professor, Head of Dpt “Economics and management”
(¹ Physics and technological Institute of metals and alloys of Ukraine NAN, Ukraine, Kiev;
² Donbass State Technical University, Ukraine, Alchevsk)*

Abstract. Study of interaction dynamics of stamp instrument with surrounding environment, expanding of its technological abilities and increase of its service life is an important and actual scientific and practical task. Results of theoretical and experimental studies of stamp instrument influence on its deformation state and durability presented. Estimation of deformation state and its distribution by hardened layer depth at the instrument cutting edges made. A new form of punch proposed, as well as vanadium hardening of its cutting edges by application of electro-spark alloying (ESA) method. Technological regimes of coating allocation, providing increase of stamps service life elaborated. Study of phase content and layer depth after ESA made. Advantages of vanadium hardened by ESA method stamp instrument considered from the point of view of amount and distribution of tension, micro hardness and hardened layer depth. Influence of those advantages on the increase of the equipment technological resource, decrease of specific material and power costs, increase of products quality and technological aggregates efficiency shown. It was proposed in the course of further studies to estimate the influence of the punch surface roughness on the hardness of the obtained by ESA method hardened layer and areas around it, to determine the optimal coating thickness as well as influence of the deformed material thickness on the considered processes.

Key words: shearing stamps, deformed state, cutting edges hardening, electro-spark alloying.

Холодная листовая штамповка является одним из распространенных видов обработки металлов давлением. Максимальный эффект от применения операций холодной листовой штамповки может быть обеспечен при комплексном решении технических вопросов на всех стадиях подготовки производства. В частности, большое внимание уделяется проблеме повышения стойкости разделительных штампов, и особенно их кромок, что в значительной степени способствует увеличению технологического ресурса оборудования, снижению удельных материало- и энергозатрат, повышению качества продукции и производительности производства.

Поэтому исследование динамики взаимодействия штампового инструмента с окружающей средой, расширение его технологических возможностей и увеличение срока эксплуатации является важной и актуальной научно-практической задачей. Решение отмеченной задачи представляется возможным при условии проведения всесторонних теоретических и экспериментальных исследований, направленных на разработку эффективных рекомендаций по совершенствованию методов упрочнения режущих кромок разделительных штампов для усовершенствования конструкции, развития теории и технологии эксплуатации отдельных узлов кузнечно-штамповочных агрегатов.

Жизненный цикл штампового инструмента и качество деталей, получаемых при разделительных операциях, в значительной степени определяются износостойкостью режущих частей, контактирующих с обрабатываемым материалом. В свою очередь, стойкость разделительных штампов зависит от уровня и распределения напряжений, возникающих в ходе технологического процесса, которые определяются свойствами штампуемого материала и режущих частей штампа, характером выполняемых операций, формой пуансона и матрицы.

В работах [1–7] приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований, из которых следует, что к вопросу повышения стойкости штампов следует подходить комплексно, сочетая различные технологические и эксплуатационные факторы, зависящие от внешних воздействий (нагрузок на рабочие части штампов), связанные с физико-механическими свойствами материала рабочих частей штампа (матрицы и пуансона), а также с износостойкостью штампуемого материала.

Достижение высокой прочности и износостойкости режущих кромок штампового инструмента в значительной степени зависит от исходных характеристик его поверхностных слоев, получен-

ных при различных способах упрочнения в сочетании с оптимальной формой режущих поверхностей.

Основной целью данного исследования являлось повышение эффективности процесса листовой штамповки и увеличение износостойкости рабочих поверхностей разделительных штампов за счет получения новых теоретических и экспериментальных данных, развития существующих методик расчета и программных средств по автоматизированному проектированию, совершенствованию конструкции и методов упрочнения режущего инструмента при условии обеспечения требуемого качества готовой продукции.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- с использованием математического моделирования оценить напряженно-деформированное состояние (НДС) и энергосиловые параметры процесса штамповки для пуансонов с различной конфигурацией режущих кромок;
- исследовать влияние параметров электроискрового легирования (ЭИЛ) на механические свойства и структуру материала разделительного инструмента;
- проанализировать НДС и его распределение по глубине упрочненного слоя на режущих кромках инструмента;
- исследовать фазовый состав по глубине упрочненного слоя, образующегося с использованием предложенного метода и режимов упрочнения поверхностей разделительных штампов;
- предложить рекомендации к практической реализации полученных теоретических и экспериментальных результатов.

Как было отмечено выше, стойкость штампового инструмента существенно зависит от твердости режущих кромок. Однако увеличение твердости дает ощутимый эффект лишь до определенного предела, при превышении которого может происходить охрупчивание инструмента.

Для повышения износостойкости необходимо создавать на поверхности слой материала со структурой и комплексом свойств, обеспечивающих расширение диапазона нормального трения и снижение интенсивности изнашивания.

Анализ различных способов упрочнения [1] позволил установить, что для повышения стойкости штампового инструмента наиболее рациональным является метод ЭИЛ, позволяющий получить твердые, износостойкие поверхностные слои из различных материалов на разделительных кромках штампов.

Для оценки НДС разделительных штампов в условиях их эксплуатации с использованием программного комплекса Abaqus [8] была разра-

ботана конечно-элементная математическая модель, представляющая собой двумерную осесимметричную задачу вырубki круглой заготовки толщиной 1 мм и радиусом 10 мм и позволяющая оценивать НДС:

– материала заготовки в процессе резания;

– упрочненных методом ЭИЛ режущих кромок матрицы и пуансона в процессе резания.

При оценке НДС материала заготовки рассматривались пуансоны, имеющие различную форму режущих кромок (табл. 1), влияющую на усилие деформации при вырубке и пробивке.

ТАБЛИЦА 1. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ ПУАНСОНА

Напряжения	Форма пуансона			
	1	2	3	4

Горизонтальные σ_x , МПа	399	500	340	496
Вертикальные σ_y , МПа	729	780	690	630

Анализ результатов моделирования показал, что форма пуансона существенно влияет на напряженное состояние металла в зоне контакта его с пуансоном (см. табл. 1) и энергосиловые параметры процесса штамповки (рис. 1).

Рис. 1. Влияние формы пуансона (1–4) на энергосиловые параметры процесса штамповки

Fig. 1. Punch form influence (1–4) for energy-power parameters of stamping process

Кроме того, при использовании пуансонов, имеющих форму 2 и 3, возможно излишнее коробление получаемой детали (вогнутость или выпуклость), а также более высокие значения имеют суммарные напряжения, которые при определенных значениях могут негативно влиять на стойкость разделительного инструмента.

На основании результатов моделирования процесса листовой штамповки можно утверждать, что среди рассмотренных форм пуансонов наиболее приемлемой является форма 4, для которой:

– сила на пуансоне является наименьшей среди всех форм, что объясняется наличием дополнительных растягивающих напряжений в зоне реза за счет изгиба заготовки при заостренной форме режущей кромки;

– контактные напряжения на инструменте на 9 % превышают аналогичные значения для формы 3 и на 12 % ниже, чем для формы 2. Это позволяет предполагать, что срок службы такого пуансона будет выше, чем для формы 2;

– затраты энергии на выполнение разделительной операции несколько выше, чем для форм 1 и 2, что объясняется дополнительными ее затратами на предварительную деформацию заготовки. Однако по сравнению с пуансоном формы 3 требуется меньше энергии на выполнение разделительной операции.

Для повышения стойкости штампового инструмента было выполнено упрочнение его режущих кромок с использованием метода ЭИЛ. При проведении экспериментов на закаленные образцы стали У8А наносили покрытия из различных тугоплавких материалов (ванадий, титан, вольфрам, графит и сормайт). Режимы ЭИЛ опытных образцов представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ, ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ПРИ НАНЕСЕНИИ ПОКРЫТИЙ

TABLE 2. ESA REGIMES USED AT COATINGS APPLICATION

Номер образца	Материал электрода	Емкость, мкФ	Напряжение, В	Сила тока, А
1–10	Ванадий	300	56	3,0–3,5
11–20	Вольфрам	200		
21–30	Графит	300		
31–40	Титан	200		
41–50	Сормайт	100		

Оценку эффективности полученных покрытий производили по величине микротвердости и глубине упрочненных слоев с использованием прибора для определения микротвердости ПМТ-3 с индентором в виде четырехгранной алмазной пирамиды с углом при вершине 136 град. и нагрузкой 50 г.

Рис. 2. Значения микротвердости и глубины упрочненного слоя при использовании различных материалов для электроискрового легирования

Fig. 2. Microhardness values and hardened layer depth at utilization of different materials for electro-spark alloying (ESA)

Изучение микроструктуры и глубины упрочненного слоя металлографическим методом выполнялось с использованием оптического микроскопа МИМ-8. Травление проводилось 3 %-ным раствором HNO_3 в спирте. Для оценки глубины слоя применялись объект- и окуляр-микрометр.

Результаты проведенных исследований представлены на рис. 2 и свидетельствуют о возможности и целесообразности применения ванадия в качестве упрочняющего материала для режущих поверхностей штампового инструмента при выполнении разделительных операций листовой штамповки.

Несмотря на то что при легировании образцов вольфрамом микротвердость упрочненного слоя имеет наибольшие значения по сравнению со всеми использованными материалами, повышенная его склонность к трещинообразованию ограничивает применение этого материала для упрочнения штампового инструмента.

Для получения качественного ванадиевого покрытия на рабочей поверхности инструмента, изготовленного из стали У8А, были проведены исследования с целью разработки оптимального режима ЭИЛ.

Изготовленные из инструментальной стали У8А образцы подвергали типовой термической обработке на максимальную твердость (закалка в воде от температуры 800 °С, отпуск при 200 °С). После термообработки образцы, имеющие твердость в пределах 65–67 HRC и шероховатость поверхности ~0,25 мкм, шлифовали и подвергали ЭИЛ ванадием. Слой наносился на торцевую поверхность площадью 1 см² при удельной продолжительности легирования 5 мин/см². Режимы нанесения упрочняющего покрытия представлены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. РЕЖИМЫ НАНЕСЕНИЯ ВАНАДИЯ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

TABLE 3. REGIMES OF VANADIUM APPLICATION BY ELECTRO-SPARK ALLOYING METHOD

Номер режима	Напряжение, В	Емкость, мкФ	Сила тока, А
1	100	30	0,5
2	56	300	3,5
3	200	500	0,5
4	200	230	0,5

Далее проводилась оценка микротвердости полученной упрочненной поверхности и глубины упрочненного слоя (рис. 3).

Рис. 3. Значения микротвердости и глубины упрочненного слоя при различных режимах электроискрового легирования ванадием

Fig. 3. Microhardness values and hardened layer depth at different regimes of electrospark alloying by vanadium

Из проанализированных четырех режимов ЭИЛ ванадием (см. табл. 3) наиболее оптимальным по технологии нанесения, значениям микротвердости и глубины упрочненного слоя является режим № 2, реализованный при $U = 56$ В; $I = 3,5$ А; $C = 300$ мкФ; $R = 10$ Ом. Данный режим обеспечивает качественное соединение материала электрода (ванадия) с основным металлом, что способствует увеличению прочности и износостойкости упрочненного слоя.

С целью оценки НДС и его распределения по глубине упрочненного слоя на режущих кромках инструмента выполнено теоретическое исследование с использованием метода конечных элементов величины указанных напряжений.

Согласно поставленной задаче разработанная модель учитывает возможность нанесения на поверхность инструмента покрытия, имеющего толщину около 20 мкм и отличные от основного металла механические свойства, изменяющиеся по толщине покрытия. С этой целью уплотняли сетку в области возможного покрытия, а для описания свойств покрытия задавали поле, позволяющее учесть изменение свойств упрочненного слоя (рис. 4).

Результаты моделирования напряженного состояния режущего инструмента на примере полей распределения эквивалентных по Мизесу напряжений в вершине пуансона с нанесением покрытия и без него при внедрении в материал заготовки на 0,1 мм представлены на рис. 5.

Рис. 4. Вершина пуансона с уплотненной сеткой в области возможного покрытия (а) и поле, позволяющее учесть изменение свойств упрочненного слоя (б)

Fig. 4. Punch head with thickened net in the area of possible coating (a) and the field, enabling to take into account the hardened layer properties change (b)

Рис. 5. Изменение коэффициента напряженного состояния в матрице (а) и пуансоне (б) при использовании инструментов без покрытия (сплошная линия) и с покрытием (пунктирная линия)

Fig. 5. Stressed state coefficient change in the matrix (a) and in the punch (b) at utilization of instruments without coatings (continuous line) and with a coating (dotted line)

Анализ полученных данных показывает, что при максимальном значении силы резания наибольшее значение показателя напряженного состояния в поверхностном слое инструментов достигается в их вершинах, где имеет место сингулярное состояние, однако в случае применения ЭИЛ $k \approx 0,6$, тогда как без упрочняющего слоя $k \approx 0,7$. В то же время напряженное состояние в поверхностном слое по контактной поверхности инструментов несколько изменяется в случае упрочнения ЭИЛ.

Таким образом, при упрочнении инструмента ЭИЛ было отмечено снижение максимального значения показателя напряженного состояния практически на 15 %. Кроме того, было отмечено, что характер изменения значения показателя напряженного состояния на поверхности разделительного инструмента на разных участках отличается, причем в непосредственной близости к вершине режущей кромки, на участке рабочей поверхности инструментов, наблюдается снижение показателя напряженного состояния до 45 %, а на боковой поверхности инструментов

наблюдается увеличение показателя напряженного состояния в поверхностном слое до 20 %. Однако при этом предел прочности материала поверхностного слоя может возрастать до 30 %, что в целом указывает на улучшение условий работы инструмента [2].

При проведении экспериментальной оценки влияния предложенного метода и режимов упрочнения поверхностей разделительных штампов на физико-механические свойства режущих кромок выполнено исследование фазового состава и глубины слоя после ЭИЛ.

Качественный фазовый анализ слоев после ЭИЛ ванадием выполнялся методом рентгеноструктурного анализа. Рентгеновская съемка исследуемых образцов проводилась с использованием дифрактометра ДРОН-1,5 в фильтрованном железнном, медном и хромовом излучениях.

Фазовый состав поверхностных слоев сталей после ЭИЛ в зависимости от глубины шлифования приведен в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4. ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ СТАЛЕЙ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГЛУБИНЫ ШЛИФОВАНИЯ

TABLE 4. PHASE CONTENT OF STEEL SURFACE LAYERS AFTER ESA DEPENDING ON GRINDING DEPTH

Глубина шлифования, мкм	Фазовый состав
Поверхность	VN, Fe ₄ N, η , α (Fe-V), A _{ост}
5±1	VN, α (Fe-V), A _{ост}
11±1	VN, α (Fe-V), A _{ост}
17±1	α (Fe-V)

Таким образом, при ЭИЛ инструментальной углеродистой стали У8А ванадием в поверхностном слое образуется высококонцентрированный твердый раствор ванадия в железе, а также нитридные и карбонитридные фазы, сосредоточенные на глубине 5–17 мкм от поверхности. По мере удаления от поверхности фазовый состав металла инструмента выравнивается и приближается к стандартному. Однако под действием температур, возникающих при проведении ЭИЛ в переходных слоях между легированной поверхностью инструмента и материалом основы, образуются мелкозернистые и закалочные структуры. Такие изменения, в свою очередь, оказывают влияние на НДС материала инструмента и на его технические характеристики, в первую очередь износостойкость.

В качестве основных выводов по результатам проведенных исследований можно отметить следующее:

– на основании результатов исследования НДС разделительных штампов в условиях их эксплуатации предложена новая форма пуансона, обеспечивающая оптимальные значения горизонтальных и вертикальных напряжений при разделении металла, что способствует уменьшению износа рабочих поверхностей инструмента ввиду перераспределения возникающих напряжений;

– для повышения стойкости штампового инструмента предложены упрочнение его режущих кромок с использованием метода ЭИЛ ванадием и технологические режимы нанесения покрытия;

– проведена оценка НДС и его распределения по глубине упрочненного слоя на режущих кромках инструмента, а также выполнено исследование фазового состава и глубины слоя после ЭИЛ;

– показаны преимущества упрочненного методом ЭИЛ ванадием штампового инструмента с точки зрения величины и распределения напряжений, микротвердости и глубины упрочненного слоя, что оказывает значительное влияние на увеличение технологического ресурса оборудования, снижение удельных материало- и энергозатрат, повышение качества продукции и производительности технологических агрегатов.

В ходе дальнейших исследований предполагается оценить влияние шероховатости поверхности пуансона на твердость получаемого методом ЭИЛ упрочненного слоя и областей, примыкающих к нему, определить оптимальную толщину покрытия, а также влияние на рассматриваемые процессы толщины деформируемого материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Луценко В.А., Коваленко О.А., Боровик П.В. Выбор метода упрочнения разделительных штампов: сб. научн. тр. Донбасского гос. технич. ун-та. — Алчевск: ДонГТУ, 2008. Вып. 27. С. 171–179.
2. Луценко В.А., Коваленко О.А., Боровик П.В. Анализ напряженного состояния поверхности разделительного инструмента после упрочнения электроискровым легированием // Обработка материалов давлением: сб. научн. тр. — Краматорск: ДГМА, 2011. Вып. 1 (26). С. 227–231.
3. Коваленко О.А. Исследование влияния исходной шероховатости инструмента, упрочняемого электроискровым легированием, на износостойкость штампового инструмента: сб. научн. тр. Донбасского гос. технич. ун-та. — Алчевск: ДонГТУ, 2011. Вып. 35. С. 228–234.
4. Коваленко О.А., Боровик П.В. Анализ исходной шероховатости рабочей поверхности инструмента при упрочнении ванадием методом электроискрового легирования // Вестник НТУ ХПИ. Сер.: “Новые решения в современных технологиях”: сб. научн. тр. — Харьков: НТУ ХПИ, 2012. Вып. 46 (952). С. 66–71.
5. Боровик П.В., Коваленко О.А. Оценка механических свойств упрочненного слоя для исследования напряженно-деформированного состояния рабочей поверхности разделительных штампов // Обработка материалов давлением: сб. научн. тр. — Краматорск: ДГМА, 2011. Вып. 4 (29). С. 192–197.
6. Луценко В.А., Коваленко О.А., Боровик П.В. Конечно-элементное моделирование разделительных операций листовой штамповки // Обработка материалов давлением: сб. научн. тр. — Краматорск: ДГМА, 2011. Вып. 3 (24). С. 15–19.
7. Ершов В.М., Коваленко О.А. Исследование процесса ванадирования стали У8А: сб. научн. тр. Донбасского гос. технич. ун-та. — Алчевск: ДонГТУ, 2005. Вып. 20. С. 271–278.
8. ABAQUS, Version 6.7 Documentation. TESIS Ltd. 2007.

Поступила 17 сентября 2018 г.

REFERENCES

1. Lutsenko V.A., Kovalenko O.A., Borovik P.V. *Vybor metoda uprochneniya razdelitel'nykh shtampov: sb. nauchn. tr. DonGTU* [Selection of a method for shearing dies hardening: Proc. DonGTU]. Alchevsk: DonGTU, 2008, no. 27, pp. 171–179. (In Russ.).
2. Lutsenko V.A., Kovalenko O.A., Borovik P.V. *Analiz napryazhennogo sostoyaniya poverkhnosti razdelitel'nogo instrumenta posle uprochneniya elektroiskrovym legirovaniem* [Analysis of stressed state of shearing instrument surface after hardening by electro-spark alloying]. *Obrabotka materialov davleniem: sb. nauchn. tr.* [Metal forming: Proc.]. Kramatorsk: DGMA, 2011, no. 1 (26), pp. 227–231. (In Russ.).
3. Kovalenko O.A. *Issledovanie vliyaniya iskhodnoi sherokhovatosti instrumenta, uprochnyaemogo elektroiskrovym legirovaniem na iznosostoykost' shtampovogo instrumenta: sb. nauchn. tr. DonGTU* [Study of an instrument initial roughness influence, hardened by electro-spark alloying, on wear resistance of stamping instrument: Proc. DonGTU]. Alchevsk: DonGTU, 2011, no. 35, pp. 228–234. (In Russ.).
4. Kovalenko O.A., Borovik P.V. *Analiz iskhodnoi sherokhovatosti rabochei poverkhnosti instrumenta pri uprochnenii vanadiem metodom elektroiskrovogo legirovaniya* [Analysis of an instrument working surface initial roughness, vanadium hardened by electro-spark alloying]. *Vestnik NTU KhPI. Seriya: “Novye resheniya v sovremennykh tekhnologiyakh”*: sb. nauchn. tr. [Bulletin of NTU KhPI. Series: “New solutions in modern technologies”: Proc.]. Khar'kov: NTU KhPI, 2012, no. 46 (952), pp. 66–71. (In Russ.).

5. Borovik P.V., Kovalenko O.A. *Otsenka mekhanicheskikh svoystv uprochnennogo sloya dlya issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya rabochei poverkhnosti razdelitel'nykh shtampov* [Estimation of mechanical properties of hardened layer for the study of shearing instruments working surface mode of deformation]. *Obrabotka materialov davleniem: sb. nauchn. tr.* [Metal forming: Proc.]. Kramatorsk: DGMA, 2011, no. 4 (29), pp. 192–199. (In Russ.).
6. Lutsenko V.A., Kovalenko O.A., Borovik P.V. *Konechno-elementnoe modelirovanie razdelitel'nykh operatsii listovoi shtampovki* [Finite-element simulation of shearing operations of sheet stamping]. *Obrabotka materialov davleniem: sb. nauchn. tr.* [Metal forming: Proc.]. Kramatorsk: DGMA, 2011, no. 3 (24), pp. 15–19. (In Russ.).
7. Ershov V.M., Kovalenko O.A. *Issledovanie protsessa vanadirovaniya stali U8A: sb. nauchn. tr. DonGTU* [Study of vanadium alloying process of U8A steel: Proc. DonGTU]. Alchevsk: DonGTU, 2005, no. 20, pp. 271–278. (In Russ.).
8. ABAQUS, Version 6.7 Documentation. TESIS Ltd. 2007.

Received September 17, 2018