

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-125-141

**\*Капырин К.И., Катунин А.А., Тряцин А.П.**

Мценский филиал Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева,

\*E-mail: kostik72@inbox.ru

## ВАЛКОВАЯ ШТАМПОВКА КАК МЕТОД ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

**Аннотация.** Статья носит обзорный и ознакомительный характер, в ней приводится краткое описание наиболее известных (классических) методов интенсивной пластической деформации (ИПД) и метода валковой штамповки. Приводятся сведения, позволяющие в дальнейшем рассматривать валковую штамповку, как один из методов ИПД. Показаны отличия в реализации двух направлений валковой штамповки – с изменением формы и без изменения. Первое недостижимо практически ни одним из известных классических способов ИПД, которые могут применяться лишь для производства наноструктурированных заготовок будущих изделий. При упрочняющей валковой штамповке дробление зерна и высокий градиент напряжений достигается за счёт локализации очага пластической деформации в условиях гидростатического сжатия. Благодаря этому оказывается возможным получение заданных градиентных механических свойств и ультрамелкозернистой структуры. Этим способом можно упрочнять цилиндрические наружные и/или внутренние поверхности деталей с созданием в них градиентной ультрамелкозернистой структуры.

Называются некоторые причины, как вполне очевидные, так неочевидные, сдерживающие широкое практическое применение технологий ИПД. Первые связаны со сложностью технической реализации, к числу вторых авторы статьи относят необходимость качественного пересмотра технико-экономической концепции производства и коммерческой реализации.

Во второй части статьи даётся краткое описание методики корректного определения закона упрочнения при ИПД, учитывающего влияние полос сдвига на макроуровне.

**Ключевые слова:** интенсивная пластическая деформация, валковая штамповка, упрочнение, ультрамелкозернистая структура, закон упрочнения при ИПД, полосы сдвига.

**Введение.** Под интенсивной пластической деформации (ИПД) понимается создание наноструктурированных и ультрамелкозернистых металлических структур повышенной прочности, многократно превышающей исходную (при использовании ИПД-обработки может быть увеличена в несколько раз). Вместе с прочностью повышаются и другие важные механические характеристики (ударная вязкость, выносливость и т.д.), но пластичность, в подавляющем большинстве случаев, уменьшается. При обработке в холодном состоянии падает электропроводность и снижается коррозионная стойкость.

Основное развитие технология ИПД получила лишь в начале 90-х в Уфе, когда на одной международной научной конференции была показана возможность создания ультрамелкозернистых структур способом равноканального углового прессования (РКУ) [1]. Результаты оказались известны широкой публике и началось бурное развитие данной технологии. Тогда, в середине 90-х годов была создана совместная британо-японская лаборатория по исследованию технологии кручения под высоким давлением (КВД), или иначе "Интенсивная пластическая деформация кручением" (ИПДК), и других способов ИПД. Возглавил лабораторию проф. Лонгдон (Langdon T.G.). Впоследствии был образован и международный

комитет по ИПД, возглавляемый проф. Р.З. Валиевым, который почти 30 лет назад и задал главный импульс всему направлению. Со временем появились способы винтовой экструзии (ВЭ), метод «Песочные часы» (ПЧ), многократная всесторонняя ковка (ВК), аккумулирующая (или связывающая) прокатка (СП), многократный изгиб с выпрямлением (МИВ), различные модификации, например, «Конформ» (*Conform*), представляющая собой комбинацию РКУ с прокаткой, прессованием или выдавливанием (экструзией). Интересным выглядит способ, совместно предложенный уфимскими учёными из УГАТУ и УФИЦ РАН, сочетающий в себе аккумулирующую прокатку и кручение под высоким давлением, получивший название «Аккумулирующая интенсивная пластическая деформация кручением» [2; 3]. По сравнению с общеизвестным КВД этот способ позволяет получить значительно большее измельчение зерна, вплоть до получения ОМС-структур (объёмное металлическое стекло). По определённым причинам этот способ пока не получил должного внимания со стороны исследователей. К технологии ИПД относят также многократно повторяющееся выдавливание в закрытом штампе из цилиндрической заготовки по схеме «заготовка – стакан – стержень – заготовка...» [4, 5], но этот метод не нашёл пока широкой известности у исследователей. Сущность основных (классических)

способов ИПД (рис. 1) представлена в целом ряде работ, например, в обзорах [6, 7].

На рис. 2 показаны детали, полученные с применением различных методов ИПД. Это спецкрепеж из стали, титановых и алюминиевых сплавов

(а, б, в), медицинские наноструктурированные импланты (г), втулки из углеродистой стали (д), поршни из наноструктурированного алюминиевого сплава (е).

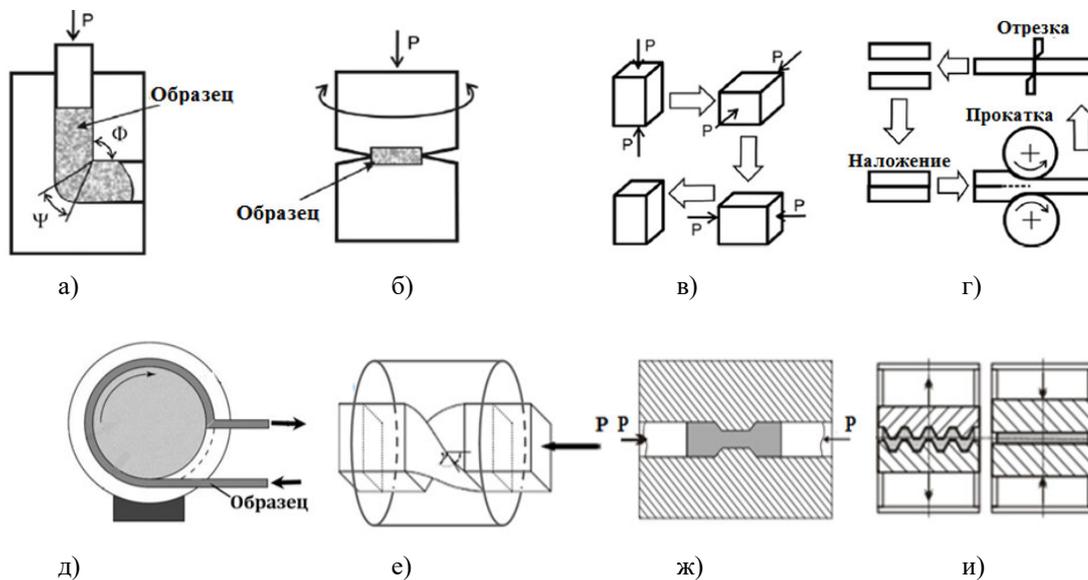


Рис. 1. Схемы классических процессов ИПД [6, 7]:

- а) Равноканально-угловое прессования, б) кручение под высоким давлением, в) связывающая прокатка, г) метод «Конформ», д) винтовая экструзия, е) метод «Песочные часы», д) многократный изгиб с выпрямлением

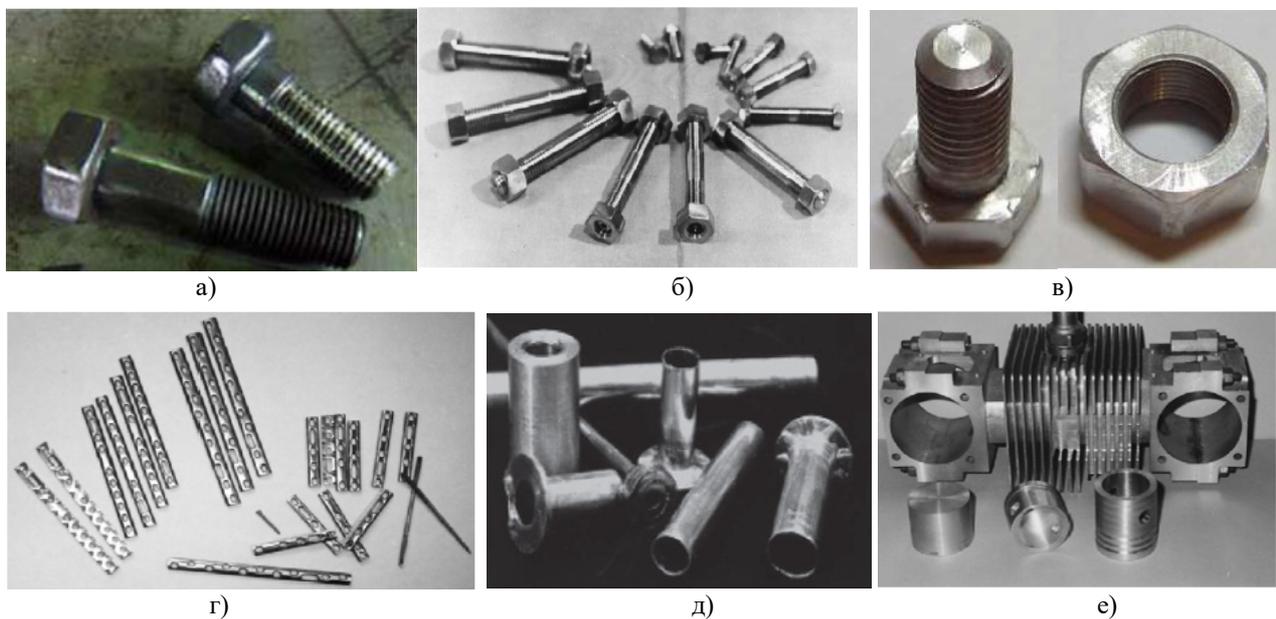


Рис. 2. Детали с УМЗ структурой, полученные ИПД-обработкой:

- а) высокопрочный крепеж из титанового сплава [8], б) болты с классом прочности 6.6 и 8.8 из сталей 20 и 45 [9], в) спецкрепеж из сплава АД1 [4], г) импланты конструкции корсета позвоночника из чистого наноструктурированного титана [10], д) втулки из углеродистой стали [11], е) поршни из алюминиевого сплава Al-Mg-Li [12]

Несмотря на достоинства на первый взгляд может показаться, что при всех преимуществах ИПД её широкое практическое применение станет обычным делом, чего, однако, пока не случилось. Подробно останавливаться на причинах этого в

данной статье мы не будем. Можно лишь указать на главные из них: во-первых, для получения градиентной ультрамелкозернистой структуры с высокими прочностными показателями требуется создание очень высоких давлений (до 5-6 ГПа и

выше), что значительно увеличивает нагрузку на инструмент и приводит к его быстрому износу, во-вторых, отсутствие доступной и удобной технической литературы не позволяет инженерам разрабатывать конкретные технологические процессы, и в-третьих, необходим качественный пересмотр всей технико-экономической концепции производства и коммерческой реализации подобных изделий. Ещё одно препятствие связано с нежеланием или боязнью производителей менять давно отлаженные технологические цепочки. На сегодняшний день практическое применение технологии ИПД нашли лишь электротехнической промышленности для изготовления медных шин и кабелей методом «Конформ» и в медицине: наноструктурированные импланты (зубные, позвоночные и др.) обладают лучшей приживляемостью в организме человека.

**Основная часть.** Наряду с уже ставшими традиционными существуют и другие, менее известные для широкого круга исследователей способы ИПД. Одним из них является *валковая штамповка* (ВШ). Метод основан на совмещении двух процессов: монотонного осевого сжатия и обкатки боковой поверхности роликами

или приводными валками [13, 14, 15]. В результате такого нагружения создаётся комплексное локальное воздействие на очаг пластической деформации, значительное гидростатическое сжатие в деформируемом (локализованном) объёме и высокий градиент напряжений.

Валковая штамповка делится на два направления и может быть формоизменяющей и упрочняющей. Схемы осуществления представлены на рис. 3.

*Формоизменяющая валковая штамповка* (слева) позволяет изготавливать практически готовые осесимметричные детали (типа стаканов, втулок и т.п.) минуя стадию ИПД-обработки исходной заготовки традиционными методами. Это недостижимо практически ни одним из известных классических способов ИПД (за исключением многократного выдавливания, [4, 5]), которые могут применяться лишь для производства наноструктурированных заготовок будущих изделий, а не самих изделий. Получение градиентной микроструктуры создаётся за счёт многоциклового локальной обработки боковой поверхности изделия за один проход пуансона прошивки.

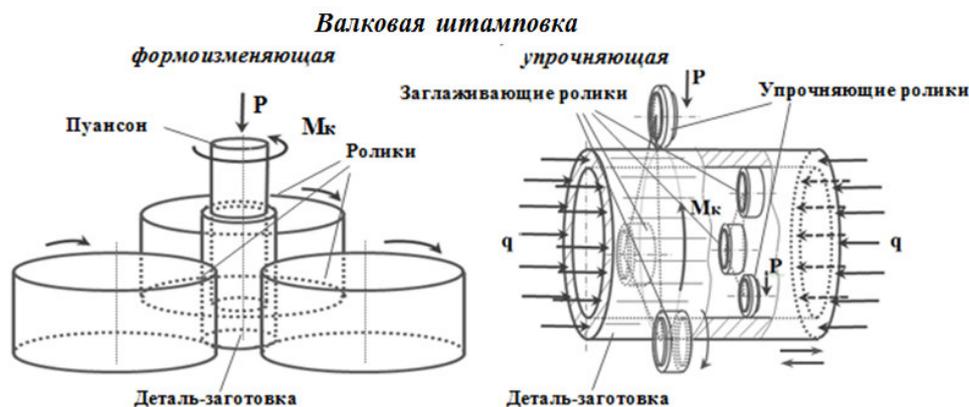


Рис. 3. Схемы валковой штамповки

Исходная заготовка, цилиндр, устанавливается в роликовую матрицу, включается привод вращения пуансона и нижней опоры, на которую опирается заготовка, а формообразование осуществляется при одновременном действии двух процессов – прошивки и поперечной прокатки. В случае осуществления привода вращения не от пуансона и упора, крутящий момент прикладывается к боковой поверхности заготовки приводными валками, при этом напряжённо-деформированное состояние таких процессов будет отличаться [15].

Фото экспериментальных образцов, полученных формоизменяющей ВШ показаны на рис. 4, а-д. Для образцов, изображённых на рис. 4 размеры составляют:

а) диаметр заготовки – 25 мм, диаметр пуансона – 20 мм, высота заготовки – 30 мм, высота детали – 75 мм;

б, в, г) диаметр заготовки – 30 мм, диаметр пуансона – 22 мм, высота заготовки – 32 мм, высота фланца – 15 мм;

д) диаметр заготовки – 30 мм, диаметр пуансона – 22 мм, ролики с калибрующим участком в верхней части.

При использовании способа многократного выдавливания в закрытых штампах по маршруту "стакан – стержень – цилиндр – стакан – стержень – ... и т.д.) [4, 5] также возможно получение подобных деталей (рис. 5), однако, в отличие от валковой штамповки для получения мелкозернистой структуры здесь требуется много большее количество проходов. К тому же, очевидно, что

деформирующее усилие будет значительно выше: ориентировочно в пять-шесть раз (рис. 6).

Давление гидростатического сжатия, соответственно, так же.

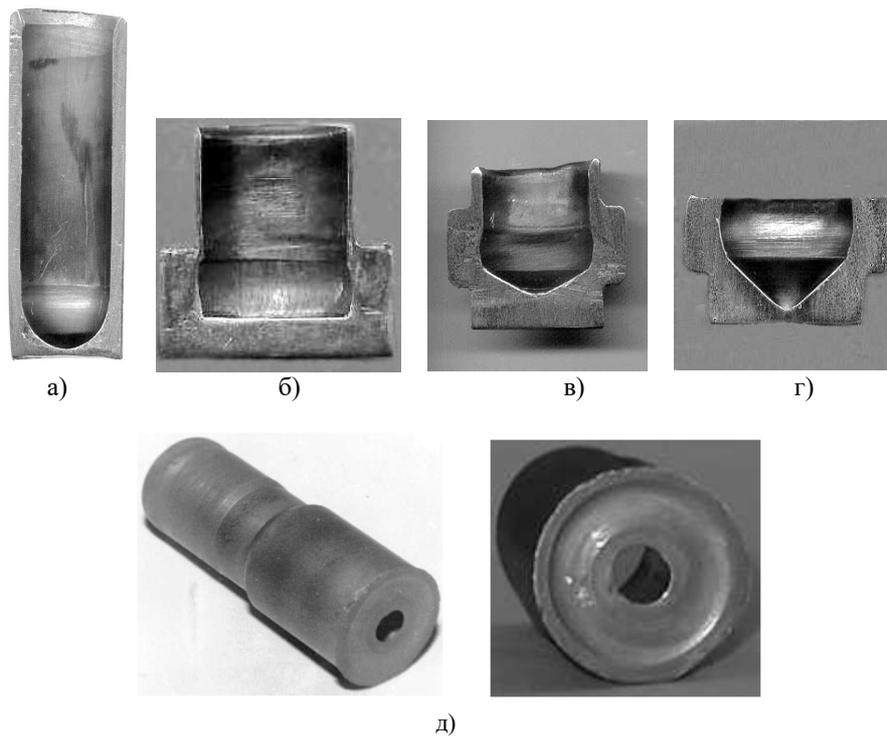


Рис. 4. Образцы деталей, полученные формоизменяющей валковой штамповкой за один переход: а) стакан с высокой стенкой, б, в, г) с фланцем, д) со сквозным осевым отверстием [14]



Рис. 5. Образец, подвергнутый обработке методом многократного выдавливания [4, 5]: а) исходная заготовка, б) стакан, в) стержень с утолщением (получен из б); г) образец, полученный после завершения цикла выдавливания (приобретает форму исходной заготовки)

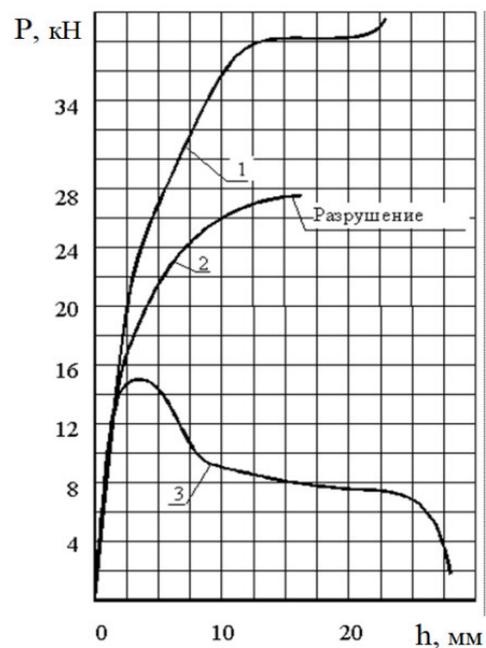


Рис. 6. Диаграммы нагружения [16]:  
 1) при обратном выдавливании,  
 2) при открытой прошивке,  
 3) при формоизменяющей валковой штамповке

Фото образца (рис. 4, д) иллюстрирует возможность получать на одной позиции обработки детали со сквозным осевым отверстием за счёт утяжки материала под действием радиальных

растягивающих напряжений. Подробно вопрос рассмотрен в [15, 17]. Схема процесса показана на рис. 7.

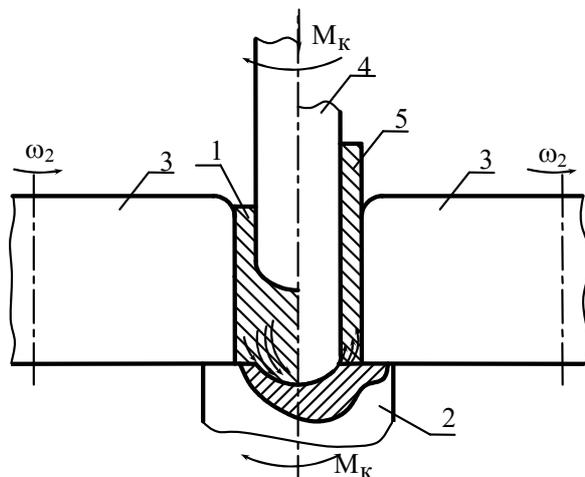


Рис. 7. Схема к способу штамповки деталей со сквозным осевым отверстием:  
1) заготовка в начальный момент деформирования, 2) упор с глухой сферической полостью,  
3) ролики, 4) пуансон, 5) заготовка в конечный момент деформирования

Для изготовления ступенчатых деталей и втулок со сквозным осевым отверстием были предложены способы, представленные на рис. 8, 9 (защищены патентами Российской Федерации). Сущность способа штамповки ступенчатых деталей (рис. 8), заключается в поэтапном формировании боковой поверхности заготовки сначала в

черновом, а затем и в чистовом калибре роликовой матрицы [18]. Особенностью второго способа является то, что штамповка ведётся от прутка (рис. 9), а разделение материала происходит в опасном сечении в кольцевой части за счёт рассогласования скоростей вращения прутка и инструмента [19].

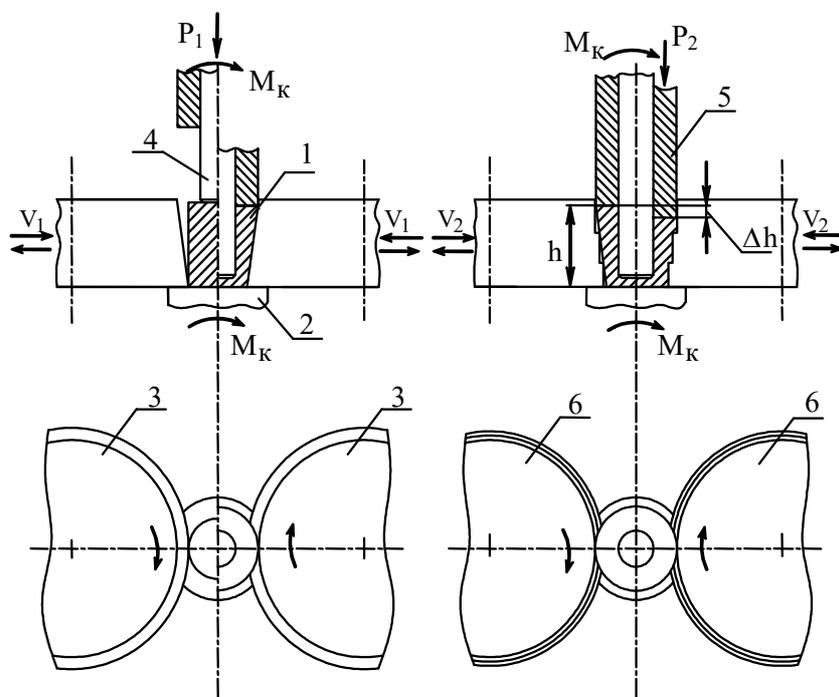


Рис. 8. Схема к способу валковой штамповки ступенчатых деталей в роликовой матрице:  
1) заготовка, 2) упор, 3) ролики чернового калибра, 4) прошивной пуансон, 5) пуансон осадки,  
6) ролики чистового калибра

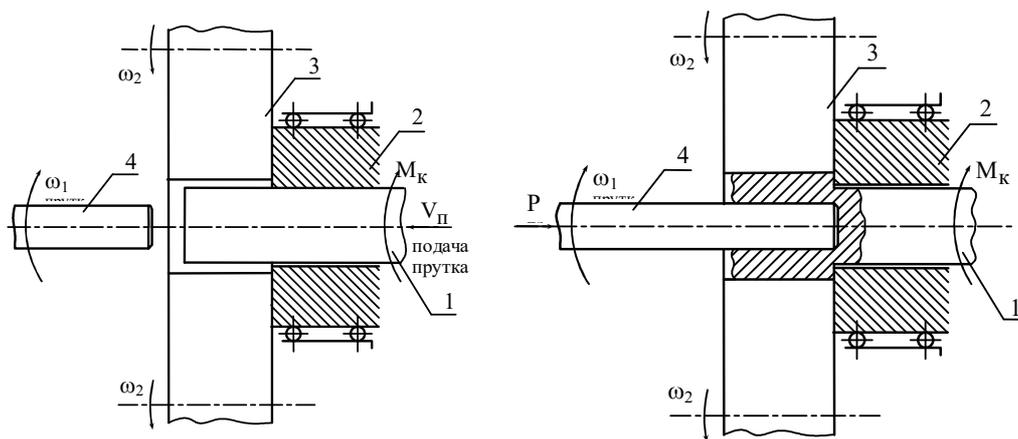


Рис. 9. Схема к способу валковой штамповки заготовок со сквозным осевым отверстием от прутка

**Упрочняющая валковая штамповка.** В общем виде схема показана на рис. 3 справа. Обработка может осуществляться как по наружной [20, 21], так и по внутренней поверхности [22, 23]. Упрочняющий ролик является основным инструментом, служащим для изменения микроструктуры. Заглаживающие ролики (один или два) предназначены

для выглаживания образовавшейся волны. При этом минется знак деформации и обеспечивается полный цикл растяжения-сжатия за один оборот (в локальной зоне). Схема деформации показана на рис. 10 [15, 24].

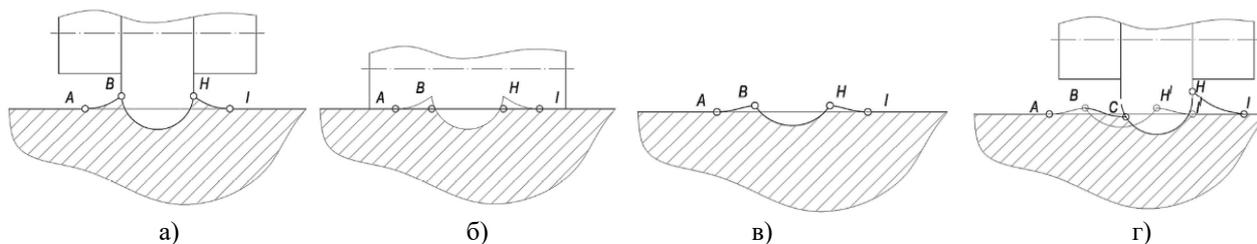


Рис. 10. Деформация поверхности детали на основных стадиях упрочняющей валковой штамповки [24]: а) внедрение деформирующего ролика, б) деформирование заглаживающим роликом, в) отвод заглаживающего ролика, г) внедрение деформирующего ролика со смещением на величину шага подачи

Поверхность формируется многократным возвратно-поступательным осевым перемещением роликов вдоль образующей. На первой стадии (а) происходит накатывание деформирующего ролика с образованием задней АВ и фронтальной волны НІ. Затем происходит накатывание и отвод заглаживающего ролика (б, в) с упругой разгрузкой. Полного восстановления образующей поверхности не происходит. Стадия (г) иллюстрирует накатывание деформирующего ролика на новое сечение со смещением на величину шага подачи.

Эффект упрочнения может носить как поверхностный, так и объёмный характер. Этим способом можно упрочнять цилиндрические наружные и/или внутренние поверхности деталей с созданием по сечению заданной градиентной ультрамелкозернистой структуры (УМЗ). Дополнительным условием служит наличие осевой сжимающей силы  $q$ , благодаря которой может возникать высокий градиент напряжений и интенсивное измельчение зерна за счёт одновременного воздействия этой силы и локализации

очага пластической деформации, обеспечивающих гидростатическое сжатие в зоне обработки. Такая схема нагружения представляет собой ИПД в "чистом виде".

Схема нагружения с осевым сжатием представляет собой перспективное, и пока неизученное направление валковой штамповки. В работе [7] отмечается высокий потенциал и перспектива подобных подходов. В частности, там говорится о возможности достижения значения параметра Одквиста до  $\varepsilon=20$  и выше. Есть предположение, что при таком способе нагружения становится возможным практически неограниченный монотонный его рост без выхода на плато с получением ультрамелкозернистой структуры со сверхмалыми размерами зёрен, соизмеримыми с КВД (ИПДК), т.е. порядка 100 нм. Ф.З. Утяшев объясняет это влиянием масштабного фактора: чем меньше очаг деформации при ИПД, тем более глубокое измельчение достигается в заготовке [25].

Фото экспериментальных образцов, полученных упрочняющей ВШ, показаны на рис. 11.

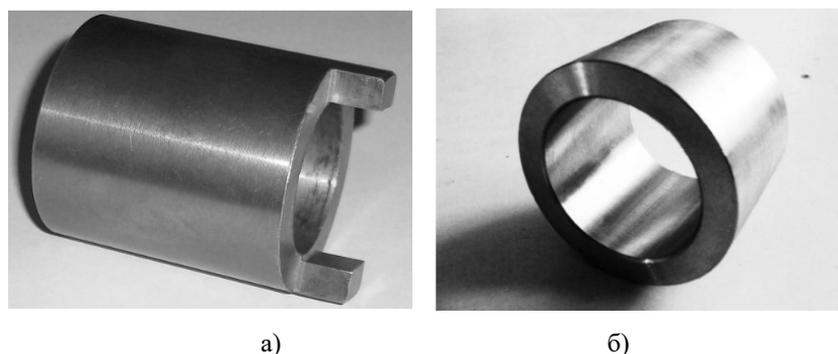


Рис. 11. Образцы деталей, полученные упрочняющей валковой штамповкой [15]:  
а) обработка по наружной поверхности, б) обработка по внутренней поверхности

Для получения заготовок и деталей с УМЗ-структурой был предложен целый ряд различных

способов, два из них представлены на рис. 12 (защищены патентами Российской Федерации).

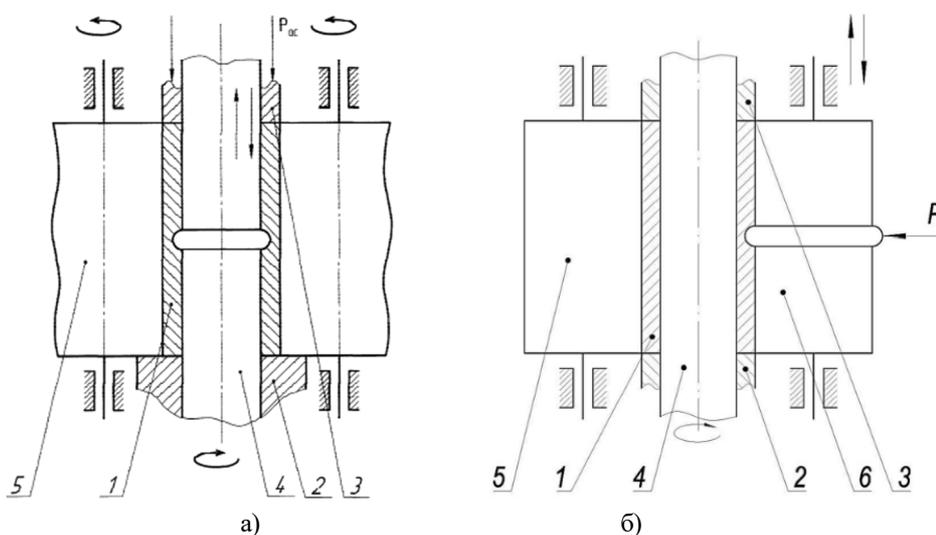


Рис. 12. Схемы упрочнения втулок:  
а) по внутренней поверхности [26], б) по внешней поверхности [27]

Цифрами обозначено: 1-заготовка (втулка), 2 и 3-упор и прижим; 4- оправка; 5-поддерживающий ролик, 6-деформирующий ролик.

Исследования упрочняющей валковой штамповки. Способ упрочнения с осевым сжатием (как на рис. 3 справа) также защищена патентом [28]. На рис. 13 представлена запатентованная схема обработки (а) и математическая модель процесса (б).

Цифрами на схеме (а) обозначено: 1-заготовка, 2-оправка, 3-упор, 4-прижим, 5-заглаживающий ролик, 6-деформирующий ролик. На схеме математической модели (б) обозначено: 1, 2, 3, 4 - внутренняя, внешняя и торцевые поверхности заготовки, 5- заглаживающий ролик, 6- деформирующий ролик.

Расчётная схема была составлена в соответствии с принципом деформации, представленном

на рис. 10. Моделирование осуществлялось методом конечных элементов в пакете прикладных программ «ШТАМП» [31]. По результатам моделирования авторами были построены кривые распределения микротвёрдости и проведено сравнение с данными эксперимента. В качестве объекта для исследования использовалась втулка из оловянистой литой бронзы Бр.ОЦС 5-5-5. Наружный диаметр – 70 мм, внутренний – 50 мм. Эксперимент и моделирование осуществлялись без осевого сжатия: давление осевого сжатия  $q$  (см. рис. 3 справа) – не прикладывалось. Обкатка осуществлялась по внутренней поверхности. Исходная заготовка – не отожжённая, средняя твёрдость в исходном состоянии  $\overline{HV}_{исх} = 112,3 \text{ кгс/мм}^2$ .

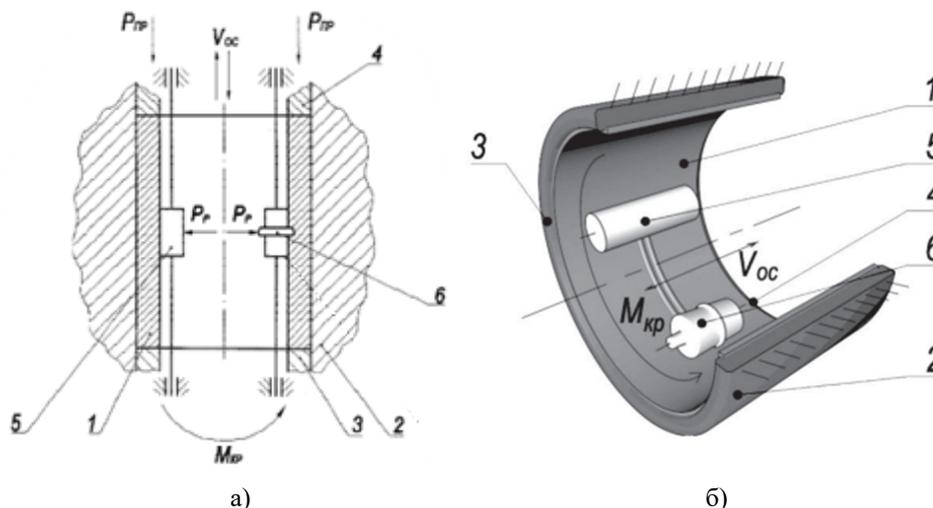


Рис. 13. Схема способа упрочнения с осевым сжатием:  
а) защищённая патентом (а) [28] и б) математическая модель процесса [29, 30]

На рис. 14, а представлено распределение микротвёрдости при *упрочняющей валковой штамповке* в зависимости от числа проходов для оловянистой литой бронзы Бр.ОЦС 5-5-5 [29, 30, 32]. Видно, что даже в неотожжённом состоянии и без осевого сжатия, твёрдость повышается в 2,5 раза (после 30 проходов), что сопоставимо с другим, популярным у исследователей способом ИПД, кручением под высоким давлением (КВД). При этом отметим, что кручение под высоким давлением считается одним из тех способов ИПД, которые дают максимальное упрочнение. Промышленное применение этого способа маловероятно ввиду небольших размеров получаемых заготовок (до 20 мм в диаметре и 3-4 мм по толщине). Таким образом, роль и место валковой штамповки, как метода ИПД становится очевидной. На рис. 14, б показаны кривые распределения микротвёрдости при КВД в зависимости от числа проходов для литого алюминий-магниевого сплава  $Al-3Mg-0,25Sc$  [33], на рис. 14, в – для оловянистой бронзы  $Cu-1Sn$  [34]. Видно, что и кручение под высоким давлением и валковая штамповка показывают схожие результаты упрочнения. Это трёхкратное увеличение твёрдости при КВД сплава  $Al-3Mg-0,25Sc$  после пяти оборотов (проходов). При тех же условиях твёрдость оловянистой бронзы марки  $Cu-1Sn$  возрастает приблизительно в 3,6 раза.

#### Корректное определение закона упрочнения при ИПД

На сегодняшний день накоплен огромный багаж знаний по ИПД, основанных как на экспериментальных исследованиях, так и на теоретических, полученных, в основном, численным моделированием. Эксперимент, конечно, даёт полную и наиболее достоверную картину процесса, но отнимает много больше материально-технических ресурсов. Численное моделирование, хоть и требует много времени для расчёта, но отнимает

значительно меньше средств, особенно при проведении многофакторного эксперимента. И здесь хотелось бы отметить следующую проблему моделирования процессов ИПД – корректное задание начальных параметров.

Одной из важнейших входных характеристик является зависимость, описывающая закон упрочнения, или кривая упрочнения. Известно, что при холодной пластической деформации в некоторых материалах образуются такие дефекты поликристаллов, как мезо- и макрополосы, а также полосы сдвига, проявляющиеся на мезо- и макроуровне. Они не нарушают сплошности материала, но способствуют образованию и развитию трещин, что вызывает разупрочнение материала в конечной стадии деформации. Их зарождение и развитие происходит уже на начальном этапе деформации [35]. Так, например, при осадке литой заготовки из сплава Бр.ОЦС 5-5-5 интенсивность деформации достигает насыщения при  $\epsilon = 0,6$  (рис. 15, а), после чего образование мезополос носит уже необратимый характер и при  $\epsilon = 0,9$  происходит разрушение. На рис. (рис. 15, б) показана фотография микроструктуры с ярко выраженными структурами мезополос сдвига в разрушенном образце.

В условиях ИПД образование мезополос подавляется высокими значениями гидростатической компоненты тензора напряжений и разупрочнения не происходит. Следовательно, использование для численного моделирования "обычных" кривых упрочнения (например, по результатам теста на осадку), внесёт ошибку в расчёт уже на стадии подготовки входных данных. Поэтому необходимо как-то учесть вклад, который дают эти структурные образования и "вычесть" их действие из кривой упрочнения, т.е. учесть их вклад в суммарную накопленную деформацию.

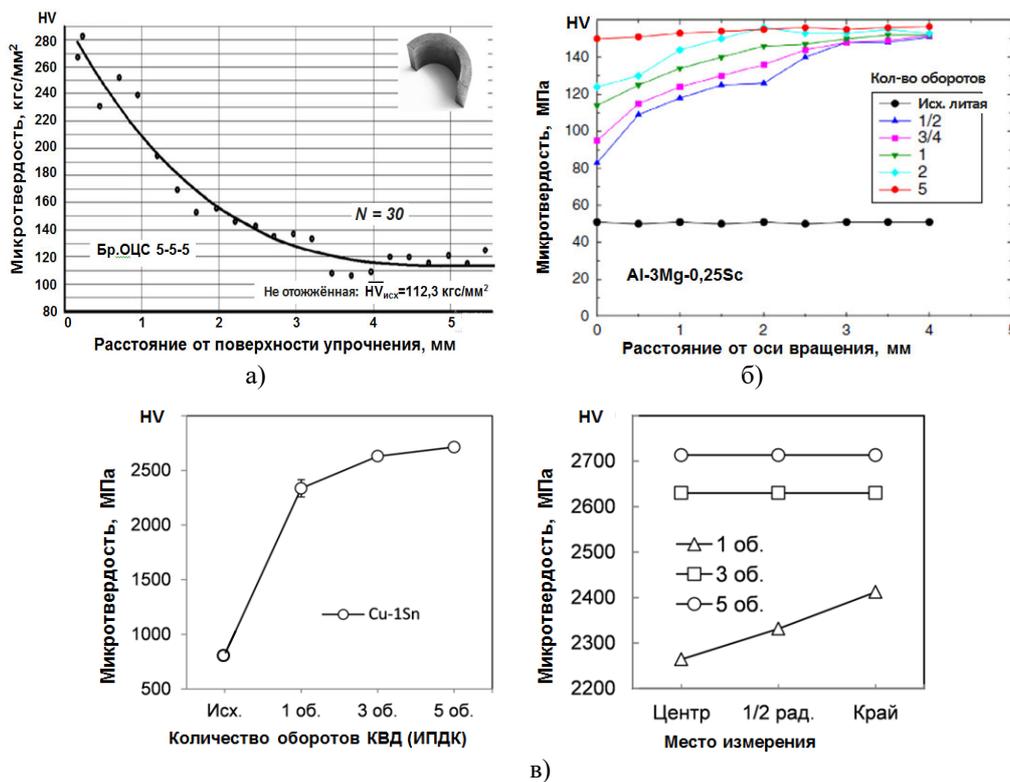


Рис. 14. Распределение микротвёрдости при упрочняющей валковой штамповке втулки (по внутренней поверхности) из неотожжённой бронзы марки Бр.ОЦС 5-5-5 после 30 проходов (а) [30], то же после КВД сплава Al-3Mg-0,25Sc (б) [33] и отожжённой бронзы марки Cu-1Sn (в) [34] в зависимости от числа проходов (оборотов)

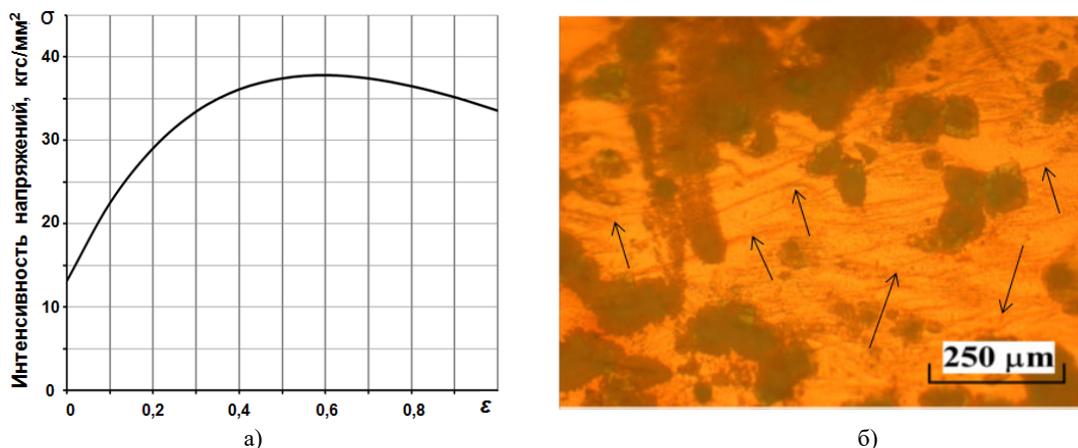


Рис. 15. Кривая упрочнения (а) [36] и мезополосы сдвига (б) [35], полученные при сжатии бронзы БрОЦС 5-5-5

В работах [35; 37] опубликовано подробное описание метода построения кривых упрочнения при ИПД. В настоящей работе приводится лишь краткое описание всех этапов построения. Сложность заключается в том, что в процессах ИПД накопленная деформация может достигать очень больших значений, что недостижимо при проведении стандартных испытаний (например, в тесте на осаживание). Другая сложность заключается в том, что деформация оказывается неоднородной и не поддаётся прямому измерению, по-

этому публикации по экспериментальным кривым упрочнения материалов в диапазоне сверхбольших деформаций практически отсутствуют.

Приведём краткое пошаговое описание предложенного метода. Он состоит из следующих этапов.

На первом этапе необходимо построить экспериментальную кривую  $HV(\sigma)_{\text{эксп}}$ . Для этого необходимо сначала построить (осадкой в условиях "нулевого" трения) кривую упрочнения  $\sigma(\epsilon)$ . Нивелировать действие трения можно одним из известных способов. Наиболее верным будет осу-

ществить осадку в несколько этапов. После каждого из которых нужно будет устранить бочкообразность и добиться тем самым однородной деформации. Тем же способом следует получить несколько промежуточных образцов. Строить кривые  $\sigma(\epsilon)$  для них нет необходимости, но требуется провести измерение микротвёрдости  $HV$ . По полученным данным строится экспериментальная кривая  $HV(\sigma)_{\text{эксп}}$ . Для этого потребуется подготовить микрошлифы исходного образца ( $\epsilon_0$ ), образцов осажённых с разной степенью деформации (промежуточных) и доведённого до разрушения при  $\epsilon = \epsilon_{\text{max}}$ . Затем нужно определить среднее значение  $\overline{HV}$ . Количество измерений микротвёрдости в

исследуемых образцах должно быть таким, чтобы свести к минимуму значение среднеквадратичного отклонения от  $\overline{HV}$ . После чего можно построить экспериментальный график зависимости  $HV(\sigma)_{\text{эксп}}$ , рис. 16.

На втором этапе по результатам теста на осадку строится начальный участок истинной ИПД-кривой упрочнения  $\sigma(\epsilon)$  с "вычетом" вклада мезополос. Для этого на поле графика экспериментальной кривой  $HV(\sigma)_{\text{эксп}}$  нужно построить пробную кривую  $HV(\sigma)_{\text{проб}}$

Для вычисления значений  $HV(\epsilon)$  используем следующую формулу [38]:

$$HV(\epsilon) = 0,3132 \cdot [\sigma(\epsilon) + \sigma(\epsilon + 0,3)] \cdot [1 + \ln[E \operatorname{tg} 22^\circ / (3\sigma(\epsilon))]] \quad (1)$$

Необходимо подобрать такие значения напряжений и соответствующих им деформаций, которые дадут значения  $HV(\sigma)$ , максимально точно повторяющие кривую микротвёрдости  $HV(\sigma)_{\text{эксп}}$ .

Если эти кривые ложатся друг на друга, или окажутся близки, то значения  $\sigma(\epsilon)$  в формуле (1) были выбраны верно. Тогда можно переходить к построению начального участка истинной ИПД-

кривой упрочнения  $\sigma(\epsilon)$  по координатам произвольно заданных значений деформаций  $\epsilon$  в интервале от  $\epsilon_0$  до  $\epsilon_{\text{max}}$  и соответствующих им произвольно заданных значений напряжений  $\sigma$ . Если это не так (см. рис. 16), то пробная гипотетическая кривая не соответствует экспериментальной и требуется выполнить подгонку или подобрать значения  $\sigma(\epsilon)$  методом перебора. Описание подгонки здесь не приводится (подробно см. в [37]).

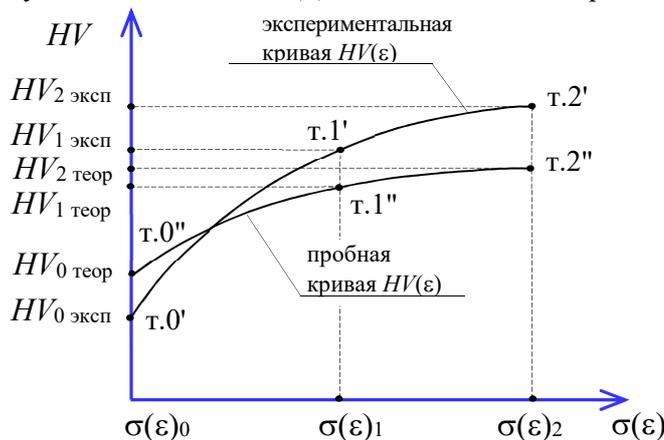


Рис. 16. Пробная  $HV(\sigma)_{\text{теор}}$  и экспериментальная  $HV(\sigma)_{\text{эксп}}$  кривые, построенные на одном поле графика [37]

На третьем этапе строится конечный участок истинной ИПД-кривой упрочнения  $\sigma(\epsilon)$ . Для построения конечного участка и построения полной истинной ИПД-кривой упрочнения необходимо выполнить любой экспериментальный тест на ИПД и обратное численное моделирование этого теста. Здесь также потребуется сделать микрошлифы образцов, измерить микротвёрдость и построить микропрофили  $HV$ . Затем необходимо выполнить обратное численное моделирование и по его результатам построить конечный участок кривой упрочнения. При этом нужно в точности воспроизвести все условия численного эксперимента в тесте на ИПД.

Пример истинной кривой упрочнения при ИПД показан на рис. 17.

Похожие исследования проводились несколько лет назад. По результатам анализа механических свойств при РКУ и ВЭ Л.С. Метлов и А.А. Давиденко построили обобщённую ИПД-кривую упрочнения для чистой меди [39] (рис. 18, а). В своей работе они не учитывали особенностей начального участка кривой упрочнения (этапа, на котором сказывается отсутствие мезополос сдвига при ИПД) и всё построение основывали на измерении накопленной микротвёрдости с пересчётом её в предел пластичности после достижения предельного состояния (проход №4 на рис. 18, б) в рамках созданной одним из этих авторов теории неравновесной эволюционной термодинамики (НЭТ), позволяющей учитывать

накопление микротрещин [40; 41]. Данная теория может быть использована при выполнении обратного численного моделирования теста на

ИПД на третьем этапе построения ИПД-кривой упрочнения по предлагаемому нами методу.

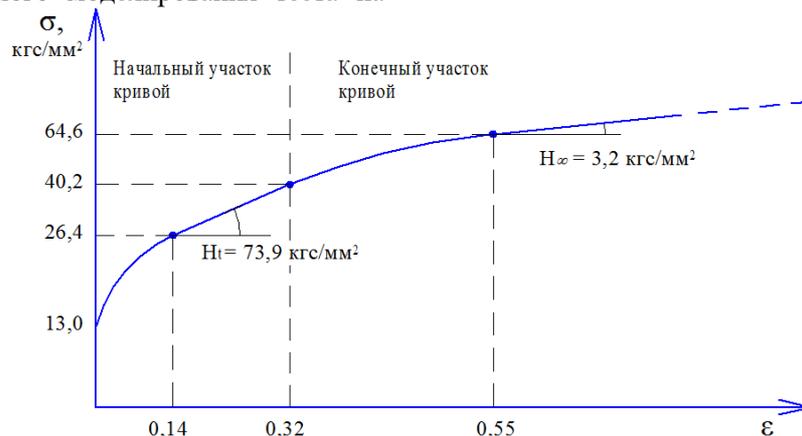


Рис. 17. Истинная ИПД-кривая упрочнения бронзы БрОЦС 5-5-5 при упрочняющей валковой штамповке без осевого сжатия [37]

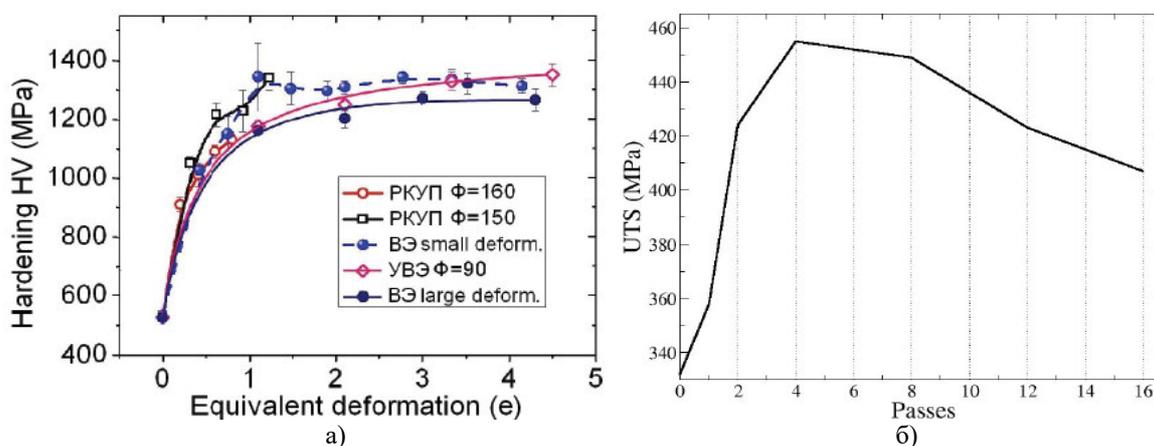


Рис. 18. Зависимости микротвёрдости от накопленной деформации (а), полученные при различных способах ИПД, и экспериментальное значение предела пластического течения (б)\* в зависимости от числа проходов (обобщённая кривая ИПД) [39]

\*ultimate tension stress (UTS) – предельное напряжение, МПа

### Выводы.

1. Метод валковой штамповки занимает своё место среди процессов ИПД и имеет широкую перспективу исследования.

2. Локализация очага пластической деформации позволяет получить высокие значения гидростатического давления, необходимого для создания условий образования ультрамелкозернистых структур, в отсутствие приложения значительных сосредоточенных силовых воздействий на инструмент и заготовку.

3. В силу отмеченных достоинств метод может быть использован в промышленном производстве для изготовления осесимметричных деталей.

4. Предложенный метод определения истинного закона упрочнения имеет адекватное научное

обоснование, но требует проведения целого комплекса исследований: многофакторного эксперимента и численного моделирования. Считаем целесообразным провести такие исследования для всех типов ИПД-материалов, что позволит существенно повысить точность численного моделирования подобных процессов и снизить затраты эксперимента. Кроме того, появляется возможность получить подтверждение или опровержение гипотезы о существовании единой кривой упрочнения процессов ИПД.

**Источник финансирования.** Работа выполнена в ОГУ имени И.С. Тургенева в рамках государственного задания № 075-01466-23-07 на 2023 год и на плановый период 2024 и 2025 годов от 24.11.2023 г., проект № FSGN-2023-002 (1023082800024-8-1.3.2).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Valiev R.Z., Krasilnikov N.A., Tsenev N.K. Plastic deformation of alloys with submicron-grained structure // *Materials Science and Engineering: A*. 1991. Vol. 137. Pp. 35–40. DOI: 10.1016/0921-5093(91)90316-F
2. Gunderov D.V., Churakova A.A., Astanin V.V., Asfandiyarov R.N., Hahn H., Valiev R.Z. Influence of high-pressure torsion and accumulative high-pressure torsion on microstructure and properties of Zr-based bulk metallic glass // *Materials Letters*. 2020. Vol. 261. Pp. 127000. DOI:10.3390/met10111433
3. Гундеров Д.В., Хасанова Д.А., Гундерова С.Д. и др. Аккумулирующая интенсивная пластическая деформация кручением // *Сборник трудов Открытой школы-конференции стран СНГ*. г. Уфа, 05–09 октября 2020. Уфа: РИЦ БашГУ. 2020. С. 27–29.
4. Утяшев Ф.З., Рааб Г.И., Валитов В.А. Деформационное наноструктурирование металлов и сплавов: монография. СПб.: Научное издание, 2020. 185 с.
5. Пат. 2189883, Российская Федерация, МКИ 7 В 21 J 5/00,13/02, С 21 D 7/02. Способ пластического структурообразования металлов при интенсивной пластической деформации и устройство для его осуществления / В.Г. Шибаков, С.Н. Гончаров, М.В. Мухин. № 2001105055/02; заявл.02.21.2001; опубл. 09.27.2002, Бюл № 2. 7 с.
6. Azushima A., Kopp R., Korhonen A., Yang D.Y., Micari F., Lahoti G.D., Groche P., Yanagimoto J., Tsuji N., Rosochowski A., Yanagida A. Severe plastic deformation (SPD) processes for metals // *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2008. Vol. 57. Pp. 716–735. DOI:10.1016/j.cirp.2008.09.005
7. Estrin Y., Vinogradov A. Extreme grain refinement by severe plastic deformation: a wealth of challenging science // *Acta Materialia*. Vol. 61 (3). 2013. Pp. 782–817. DOI: 10.1016/j.actamat.2012.10.038.
8. Zhernakov V., Yakupo R. Calculation of bolt and rivet type connections at high temperatures and dynamic loads. MAI Publisher. Moscow. 1997. 218 p.
9. Чукин М.В., Валиев Р.З., Рааб Г.И., Копцева Н.В., Юфимова Ю.Ю. Исследование эволюции структуры наносталей 20 и 45 при критических степенях пластической деформации // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2007. №4. С. 89–93.
10. Valiev R., Juster N., Rosochowski A. The new trends in SPD processing to fabricate bulk nanostructured materials // *Proceedings of the 9th International Conference on Material Forming ESAFORM: Publishing House Akapit*. April 2006. Pp. 1–9.
11. Faraji G., Torabzadeh H. An Overview on the Continuous Severe Plastic Deformation Methods // *Materials Transactions*. 2019. Vol. 60, No. 7. Pp. 1316–1330. DOI: 10.2320/matertrans.MF201905
12. Valiev R.Z., Korznikov A.V., Mulyukov R.R. Structure and Properties of Ultrafine-grained Materials Produced by Severe Plastic Deformation. *Materials Science and Engineering: A*. 1993. Vol. 168 (2). Pp. 141–148. DOI: 10.1016/0921-5093(93)90717-S
13. Голенков В.А., Радченко С.Ю. Технологические процессы обработки металлов давлением с локальным нагружением заготовки. М.: Машиностроение, 1997. 232 с.
14. Голенков В.А. Дмитриев, В.Д. Кухарь, С.Ю. Радченко, С.П. Яковлев, С.С. Яковлев. Специальные технологические процессы и оборудование обработки давлением. М.: Машиностроение, 2004. 464 с.
15. Голенков В.А., Радченко С.Ю., Дорохов Д.О. Теория и технология валковой штамповки. М.: Издательский дом "Оружие и технологии", 2019. 323 с.
16. Голенков В.А., Радченко С.Ю., Капырин К.И. Особенности пластического формоизменения заготовок и анализ изменения рабочей нагрузки при валковой штамповке в зависимости от формы торца пуансона // *Механика деформированного твердого тела и обработка металлов давлением: Сб. научных трудов ТулГУ, Тула: ТулГУ*. 2000. С.17–21.
17. Радченко С.Ю., Капырин К.И. К вопросу о механизме образования сквозного осевого отверстия при валковой штамповке // *Механика деформированного твердого тела и обработка металлов давлением. Ч.2: Сб. научных трудов ТулГУ, Тула: ТулГУ*. 2003. С. 96–101.
18. Пат. 2102179, Российская Федерация, МКИ4 6 В 21 К 21/08 В 21 Н 1/18. Способ изготовления осесимметричных изделий со ступенчатой наружной поверхностью / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, О.В. Дорофеев, К.И. Капырин. № 95119330/03; заявл. 16.11.95; опубл. 20.01.98, Бюл № 2. – 4 с.
19. Пат. 2102179, Российская Федерация, МКИ4 6 В 21 К 21/08 В 21 Н 1/18. Способ изготовления полых осесимметричных деталей / В.А. Голенков., С.Ю. Радченко, О.В. Дорофеев., К.И. Капырин. №95119033/02; заявл. 9.11.95; опубл. 20.01.98, Бюл № 2. 4 с.
20. Голенков В.А., Радченко С.Ю., Дорохов Д.О. Формирование градиентных субмикронных наноструктурных состояний комплексным локальным нагружением очага деформации // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2009. № 3 (51) С. 54–56.

21. Голенков В.А., Радченко С.Ю., Дорохов Д.О., Грядунов И.М. Создание градиентных наноструктур в осесимметричных изделиях // Наноинженерия. 2012. № 5. С. 18–22.
22. Радченко, С.Ю., Дорохов Д.О., Грядунов И.М. Экспериментальное исследование упрочняющей обработки внутренней поверхности вкладышей подшипников скольжения в условиях комплексного локального нагружения очага деформации // Мир транспорта и технологических машин. 2013. № 3 (42). С. 67–76.
23. Радченко С.Ю., Дорохов Д.О., Грядунов И.М. Новые технологические схемы упрочняющей обработки вкладышей подшипников скольжения в условиях комплексного локального нагружения очага деформации // Мир транспорта и технологических машин. 2014. № 4 (47). С. 47–54.
24. Грядунов И.М. Упрочнение деталей типа втулок интенсивной пластической деформацией в условиях комплексного локального нагружения / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс. Орел, 2013.
25. Утяшев Ф.З. Наноструктурирование металлических материалов методами интенсивной пластической деформации // Физика и техника высоких давлений. 2010. Том 20. № 1. С. 7–25.
26. Пат. RU 2387514. Способ получения металлических втулок с градиентной субмикронной и нанокристаллической структурой / Голенков В.А., Радченко С.Ю., Дорохов Д.О. Заявка № 2008146756/02 от 26.11.2008.
27. Пат. 2340423, МПК В 24 В 39/04. Способ получения металлических втулок / В.А., Голенков, В.Г. Малинин, С.Ю., Радченко, Г.П. Короткий, Д.О.Дорохов; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ОрелГТУ». - № 2007110990/02; заявл. 26.03.2007; опубл. 10.12.2008, Бюл. №13.
28. Пат. RU 2462327 С2, 27.09.2012. Способ получения металлических втулок с градиентно-упрочненной структурой / Голенков В.А., Радченко С.Ю., Грядунов И.М. Заявка № 2010153917/02 от 27.12.2010.
29. Радченко С.Ю., Дорохов Д.О., Морев П.Г., Грядунов И.М., Голенков В.А. Математическая модель упрочняющей обработки внутренней поверхности деталей типа втулок интенсивной пластической деформацией в условиях комплексного локального нагружения очага деформации // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2013. № 5 (301). С. 40–47.
30. Gryadunov I.M., Radchenko S.Yu., Dorokhov D.O., Morrev P.G. Deep hardening of inner cylindrical surface by periodic deep rolling-burnishing process // Modern Applied Science. 2015. Vol. 9. Pp. 251–258. DOI:10.5539/mas.v9n9p251
31. Канатников Н.В., Радченко С.Ю., Морев П.Г. Программа численного решения задач по обработке металлов методом конечных элементов / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018613471, 14.03.2018. Заявка № 2017663338 от 21.12.2017.
32. Радченко С.Ю., Дорохов Д.О., Грядунов И.М. Распределение микротвердости по сечению изделий при упрочнении в условиях комплексного локального нагружения // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2017. № 4 (324). С. 132–138.
33. Prabhakar Bhovi M., Patil Deepak C., Kori S.A., Venkateswarlud K., Huang Yi, Langdone Terence G. A comparison of repetitive corrugation and straightening and high-pressure torsion using an Al-Mg-Sc alloy // Journal of materials research technology. 2016. Vol. 5(4). Pp. 353–359. DOI: 10.1016/j.jmrt.2016.03.009
34. Столбовский А.В., Попов В.В., Попова Е.Н., Фалахутдинов Р.М. Влияние интенсивной пластической деформации методом кручения под высоким давлением на структуру и свойства меди и оловянистой бронзы // Diagnostics, resource and mechanics of materials and structures issue. 2017. Том 5. С. 13–22. DOI: 10.17804/2410-9908.2017.5.013-022
35. Morrev P.G., Капырин К.И., Kurdyumova L.N., Kulikov I. Yu., Tatarchenkov N.V., Gordon V.A. On construction of SPD stress-strain curve for bronze Cu85–Pb5–Sn5–Zn5 // Materials Science & Engineering: A. 2019. Vol. 764. Pp. 137889. DOI: 10.1016/j.msea.2019.05.020
36. Морев П.Г., Капырин К.И., Татарченков Н.В., Грядунов И.М. К вопросу об упрочнении с линейной материалов диаграммой сжатия // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2017. № 3 (323). С. 102–106.
37. Морев П.Г., Капырин К.И., Голенков В.А., С.Ю. Радченко, Дорохов Д.О. Построение кривых упрочнения в условиях интенсивной пластической деформации // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2022. № 3 (353). С. 43–53.
38. Giannakopoulos A.E., Larsson P.L., Vestergaard R. Analysis of Vickers indentation // International Journal of Solids and structures. 1994. Vol. 31. Pp. 2679–2708.
39. Метлов Л.С., Давиденко А.А. Анализ кривых упрочнения, полученных в процессе ИПД // Вестник ТГУ. 2013. Том18. №4. С. 1964–1965.
40. Metlov L.S. Formation of the internal structure of solids under severe load // Physical Review E.

2010. Vol. 81. 051121(9). DOI: 10.1103/PhysRevE.81.051121

41. Metlov L.S. Nonequilibrium evolution thermodynamics of vacancies // Physical Review E. 2011.

Vol. 106. 165506 (4). DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.165506

*Информация об авторах*

**Капырин Константин Игоревич**, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерно-технических дисциплин. E-mail: kostik72@inbox.ru. Мценский филиал Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева. Россия, 303031, г. Мценск, ул. Тургенева, 196.

**Катунин Андрей Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерно-технических дисциплин. E-mail: katunin57@gmail.com. Мценский филиал Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева. Россия, 303031, г. Мценск, ул. Тургенева, 196.

**Трясцин Антон Павлович**, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерно-технических дисциплин. E-mail: antondocent1968@mail.ru. Мценский филиал Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева. Россия, 303031, г. Мценск, ул. Тургенева, 196.

*Поступила 03.11.2024 г.*

© Капырин К.И., Катунин А.А., Трясцин А.П., 2024

**\*Капырин К.И., Катунин А.А., Трясцин А.П.**

*Mtsensk Branch of the Oryol State University of I.S. Turgenev*

*\*E-mail: kostik72@inbox.ru*

## ROLL STAMPING AS AN SEVERE PLASTIC DEFORMATION METHOD

**Abstract.** *This article is of an overview and introductory nature, it provides a brief description of the most well-known (classical) methods of intensive plastic deformation (SPD) and the roll forming method. Information is provided that allows further consideration of roller stamping as one of the methods of SPD. The differences in the implementation of two directions of roll forming are shown – with a change in shape and without a change. The first is unattainable by practically none of the known classical methods of SPD, which can only be used for the production of nanostructured blanks of future products. With hardening roll forming, grain crushing and a high stress gradient are achieved due to the localization of the focus of plastic deformation under hydrostatic compression conditions. Due to this, it is possible to obtain the specified gradient mechanical properties and ultrafine-grained structure. In this way, it is possible to strengthen the cylindrical outer and/or inner surfaces of parts with the creation of a gradient ultrafine-grained structure in them.*

*There are some reasons, both quite obvious and non-obvious, that constrain the widespread practical application of SPD technologies. The first are related to the complexity of technical implementation, the second is the need for a qualitative revision of the technical and economic concept of production and commercial implementation.*

*The second part of the article provides a brief description of the methodology for correctly determining the law of hardening in SPD, taking into account the influence of shear bands at the macro level.*

**Keywords:** *intensive plastic deformation, roll forming, hardening law, ultrafine grain, shear bands*

### REFERENCES

1. Valiev R.Z., Krasilnikov N.A., Tsenev N.K. Plastic deformation of alloys with submicron-grained structure. Materials Science and Engineering: A. 1991. Vol. 137. Pp. 35–40. DOI: 10.1016/0921-5093(91)90316-F

2. Gunderov D.V., Churakova A.A., Astanin V.V., Asfandiyarov R.N., Hahn H., Valiev R.Z. Influence of high-pressure torsion and accumulative high-pressure torsion on microstructure and properties of Zr-based bulk metallic glass. Materials Letters. 2020. Vol. 261. Pp. 127000. DOI:10.3390/met10111433

3. Gunderov D.V., Khasanova D.A., Gunderova S.D., et al. Accumulative severe plastic deformation by torsion [Akkumuliruyushchaya intensivnaya plasticheskaya deformatsiya krucheniem]. Proceedings by Open Conference of CIS countries. Ufa: Bashkir State University. 2020. Pp. 27–29. (rus)

4. Utiashev F.Z., Raab G.I., Valitov V.A. Deformation nano-structuring of metals and alloys [Deformacionnoe nanostrukturirovanie metallov i splavov: monographiya]. SPb.: Science intensive Technologies, 2020. 185 p. (rus)

5. Shibakov V.G., Goncharov S.N., Muchin M.V. A method of plastic structurization for metals under severe plastic deformation and proper device for the realization. Patent RF, no. 2189883, 2002.

6. Azushima A., Kopp R., Korhonen A., Yang D.Y., Micari F., Lahoti G.D., Groche P., Yanagimoto J., Tsuji N., Rosochowski A., Yanagida A. Severe plastic deformation (SPD) processes for metals. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2008. Vol. 57. Pp. 716–735. DOI:10.1016/j.cirp.2008.09.005
7. Estrin Y., Vinogradov A. Extreme grain refinement by severe plastic deformation: a wealth of challenging science. *Acta Materialia*. 2013. Vol. 61 (3). Pp. 782–817. DOI: 10.1016/j.actamat.2012.10.038.
8. Zhernakov V., Yakupo R. Calculation of bolt and rivet type connections at high temperatures and dynamic loads. MAI Publisher. Moscow. 1997. 218 p..
9. Chukin M.V., Valiev R.Z., Raab G.I., Koptseva N.V., Ufimova U.U. A Study of the nano-steels 20 and 45 structure evolution under critical values of plastic deformation [Issledovanie evolyucii struktury nanostalej 20 i 45 pri kriticheskikh stepenyah plasticheskoy deformacii]. *Herald of the MSTU G.I. Nosov*. 2007. No. 4. Pp. 89–93. (rus)
10. Valiev R., Juster N., Rosochowski A. The new trends in SPD processing to fabricate bulk nanostructured materials. *Proceedings of the 9th International Conference on Material Forming ESAFORM: Publishing House Akapit*. April 2006. Pp. 1–9.
11. Faraji G., Torabzadeh H. An Overview on the Continuous Severe Plastic Deformation Methods. *Materials Transactions*. 2019. Vol. 60, No. 7. Pp. 1316–1330. DOI: 10.2320/materials.MF201905
12. Valiev R.Z., Korznikov A.V., Mulyukov R.R. Structure and Properties of Ultrafine-grained Materials Produced by Severe Plastic Deformation. *Materials Science and Engineering: A*. 1993. Vol. 168 (2). Pp. 141–148. DOI: 10.1016/0921-5093(93)90717-S
13. Golenkov V.A., Radchenko S.U. Technological processes of metal forming with local loading of a detail [Tekhnologicheskie processy obrabotki metallov davleniem s lokal'nym nagruzheniem zagotovki]. M.: Mechanical Engineering, 1997. 232 p. (rus)
14. Golenkov V.A., Dmitriev A.M., Kuchar V.D., Radchenko S.U., Yakovlev S.P., Yakovlev S.S. Special technological processes and equipment for metal forming [Special'nye tekhnologicheskie processy i oborudovanie obrabotki davleniem]. M.: Mechanical Engineering, 2004. 464 p. (rus)
15. Golenkov V.A., Radchenko S.U., Dorokhov D.O. Theory and technology of roll stamping [Teoriya i tekhnologiya valkovoj shtampovki]. M.: Publishing House "Weapon and Technologies", 2019. 323 p. (rus)
16. Golenkov V.A., Radchenko S.U., Kapyrin K.I. Plastic forming peculiarities of a work piece and a workload variation under roll stamping versus a punch butt shape [Osobennosti plasticheskogo formoizmeneniya zagotovok i analiz izmeneniya rabochej nagruzi pri valkovoj shtampovke v zavisimosti ot formy torca puansona]. *Solid Mechanics and Metal Forming: Proceedings of Tula State Univerity*. Tula: TulSU. 2000. Pp. 17–21. (rus)
17. Radchenko S.U., Kapyrin K.I. Towards the mechanism of reach-through axial hole formation under roll stamping [K voprosu o mekhanizme obrazovaniya skvoznogo osevogo otverstiya pri valkovoj shtampovke]. *Solid Mechanics and Metal Forming. Part.2: Proceedings of Tula State Univerity*. Tula: TulSU. 2003. Pp. 96–101. (rus)
18. Golenkov V.A., Radchenko S.U., Dorofeev O.V., Kapyrin K.I. A fabrication method for axisymmetric details with a step-wise outer surface. Patent RF, no. 2102179, 1998.
19. Golenkov V.A., Radchenko S.U., Dorofeev O.V., Kapyrin K.I. A fabrication method for hollow axisymmetric details. Patent RF, no. 2102179, 1998.
20. Golenkov V.A., Radchenko S.U., Dorokhov D.O. Submicro- and nano-structured gradient states formation by means of complex local loading the deformation zone [Formirovanie gradientnyh submikro- i nanostrukturnyh sostoyanij kompleksnym lokal'nym nagruzheniem ochaga deformacii]. *Hardening technologies and coatings*. 2009. No. Pp. 54–56. (rus)
21. Golenkov V.A., Radchenko S.U., Dorokhov D.O., Gryadunov I.M. The forming of gradient nanostructures in axisymmetric products [Sozдание gradientnyh nanostruktur v osesimmetrichnyh izdeliyah]. *Nanoengineering*. 2012. No 5. Pp. 18–22. (rus)
22. Radchenko S.U., Dorokhov D.O., Gryadunov I.M. Experimental study of hardening treatment the inner surface of split-shell bearing under complex local loading of deformation zone [Eksperimental'noe issledovanie uprochnyayushchej obrabotki vnutrennej poverhnosti vkladyshej podshipnikov skol'zheniya v usloviyah kompleksnogo lokal'nogo nagruzheniya ochaga deformacii]. *The World of Transport and Technological Machines*. 2013. No. 3 (42). Pp. 67–76. (rus)
23. Radchenko S.U., Dorokhov D.O., Gryadunov I.M. New technological schemes for hardening treatment of a split-shell bearing under complex local loading of deformation zone [Novye tekhnologicheskie skhemy uprochnyayushchej obrabotki vkladyshej podshipnikov skol'zheniya v usloviyah kompleksnogo lokal'nogo nagruzheniya ochaga deformacii]. *The World of Transport and Technological Machines*. 2014. No. Pp. 47–54. (rus)

24. Gryadunov I.M. Hardening treatment for details of bush type by severe plastic deformation under complex local loading [Uprochnenie detalej tipa vtulok intensivnoj plasticheskoj deformacii v usloviyah kompleksnogo lokal'nogo nagruzheniya: Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk: PhD Dissertation on Engineering Science]. Oryol State University. Oryol, 2013. (rus)
25. Utiashev F.Z. Nanostructuring of metallic materials by severe plastic deformation [Nanostrukturirovanie metallicheskih materialov metodami intensivnoj plasticheskoj deformacii]. Physics and Technology of High Pressure. 2010. Vol. 20. No. 1. Pp. 7–25. (rus)
26. Golenkov V.A., Radchenko S.U., Dorokhov D.O. A fabrication method for metallic bushes with gradient submicro- and nanocrystall structure. Patent RF, no. 2387514, 2008.
27. Golenkov V.A., Malinin V.G., Radchenko S.U., Korotki G.P., Dorokhov D.O. A fabrication method for metallic bushes. Patent RF, no. 2340423, 2008.
28. Golenkov V.A., Radchenko S.U., Gryadunov I.M. A fabrication method for metallic bushes with gradient-hardening structure. Patent RF, no. 2462327, 2010.
29. Radchenko S.U., Dorokhov D.O., Morrev P.G., I. M. Gryadunov. Golenkov V.A. A mathematical model for hardening treatment of inner surface for details of bush type by means of severe plastic deformation under complex local loading the deformation zone [Matematicheskaya model' uprochnyayushchej obrabotki vnutrennej poverhnosti detalej tipa vtulok intensivnoj plasticheskoj deformacii v usloviyah kompleksnogo lokal'nogo nagruzheniya ochaga deformacii]. Fundamental and applied problems of techniques and technology. 2013. No. 5 (301). Pp. 40–47. (rus)
30. Gryadunov I.M., Radchenko S.Yu., Dorokhov D.O., Morrev P.G. Deep hardening of inner cylindrical surface by periodic deep rolling-burnishing process. Modern Applied Science. 2015. Vol. 9. Pp. 251–258. DOI:10.5539/mas.v9n9p251
31. Kanatnikov N.V., Radchenko S.U., P Morrev.G. A Program for numerical solution of metal forming problems by Finite Element Method. Patent RF, no. 2018613471, 2018.
32. Radchenko S.U., Dorokhov D.O., Gryadunov I.M. A microhardness distribution over detail's cross section after the hardening treatment under complex local loading [Raspredelenie mikrotverdsti po secheniyu izdelij pri uprochnenii v usloviyah kompleksnogo lokal'nogo nagruzheniya]. Fundamental and applied problems of techniques and technology. 2017. No. 4-1 (324). Pp. 132–138. (rus)
33. Prabhakar Bhovi M., Patil Deepak C., Kori S.A., Venkateswarlud K., Huang Yi, Langdone Terence G. A comparison of repetitive corrugation and straightening and high-pressure torsion using an Al-Mg-Sc alloy. Journal of materials research technology. 2016. Vol. 5(4). Pp. 353–359. DOI: 10.1016/j.jmrt.2016.03.009
34. Stolbovski A.V., Popov V.V., Popova E.N., Falahutdinov R.M. The effect of severe plastic deformation by high pressure torsion on structure and properties of copper and tin bronze [Vliyanie intensivnoj plasticheskoj deformacii metodom krucheniya pod vysokim davleniem na strukturu i svojstva medi i olovyanistoj bronzy]. Diagnostics, resource and mechanics of materials and structures issue. 2017. Vol. 5. Pp. 13–22. (rus) DOI: 10.17804/2410-9908.2017.5.013-022
35. Morrev P.G., Kapyrin K.I., Kurdyumova L.N., Kulikov I. Yu., Tatarchenkov N.V., Gordon V.A. On construction of SPD stress-strain curve for bronze Cu85–Pb5–Sn5–Zn5. Materials Science & Engineering: A. 2019. Vol. 764. 137889. DOI: 10.1016/j.msea.2019.05.020
36. Morrev P.G., Kapyrin K.I., Tatarchenkov N.V., Gryadunov I. M. Towards the hardening of materials with a linear compression diagram [K voprosu ob uprochnenii s linejnoy materialov diagrammoj szhatiya]. Fundamental and applied problems of techniques and technology. 2017. No. 3 (323). Pp. 102–106. (rus)
37. Morrev P.G., Kapyrin K.I., Golenkov V.A., Radchenko S.U., Dorokhov D.O. Construction of hardening curves under severe plastic deformation [Postroenie krivyh uprochneniya v usloviyah intensivnoj plasticheskoj deformacii]. Fundamental and applied problems of techniques and technology. 2022. No. 3 (353). Pp. 43–53. (rus)
38. Giannakopoulos A.E., Larrson P.L., Vestergaard R. Analysis of Vickers indentation. International Journal of Solids and structures. Vol. 31. 1994. Pp. 2679–2708.
39. Metlov L.S., Davidenko A.A. The analysis of hardening curves obtained in SPD process [Analiz krivyh uprochneniya, poluchennyh v processe IPD]. Herald of TSU. 2013. Vol.18, Issue 4. Pp. 1964–1965. (rus)
40. Metlov L.S. Formation of the internal structure of solids under severe load. Physical Review E. 2010. Vol. 81. Pp. 051121(9). DOI: 10.1103/PhysRevE.81.051121
41. Metlov L.S. Nonequilibrium evolution thermodynamics of vacancies. Physical Review E. 2011. Vol. 106. 165506 (4). DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.165506

*Information about the author*

**Капырин, Konstantin I.** PhD, Assistant professor. E-mail: kostik72@inbox.ru. Oryol State University named after I.S. Turgenev, Mtsensk branch. Russia, 303031, Mtsensk, st. Turgenev, 196.

**Katunin, Andrey A.** PhD, Assistant professor. E-mail: katunin57@gmail.com. Oryol State University named after I.S. Turgenev, Mtsensk branch. Russia, 303031, Mtsensk, st. Turgenev, 196.

**Tryashtsin, Anton P.** PhD, Assistant professor. E-mail: antondocent1968@mail.ru. Oryol State University named after I.S. Turgenev, Mtsensk branch. Russia, 303031, Mtsensk, st. Turgenev, 196.

---

*Received 03.11.2024*

**Для цитирования:**

Капырин К.И., Катунин А.А., Трясцин А.П. Валковая штамповка как метод интенсивной пластической деформации // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 12. С. 125–141. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-125-141

**For citation:**

Капырин К.И., Катунин А.А., Tryashtsin A.P. Roll stamping as an severe plastic deformation method. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 12. Pp. 125–141. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-125-141