

УДК 621.735

**В. А. ГРИНКЕВИЧ**, докт. техн. наук, проф., Национальная металлургическая академия Украины;

**В. Л. ЧУХЛЕБ**, канд. техн. наук, доц., Национальная металлургическая академия Украины;

**Г. БАНАШЕК**, канд. техн. наук, доц., Политехника Ченстоховская, г. Ченстохова Польша;

**А. В. АШКЕЛЯНЕЦ**, канд. техн. наук, доц., Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск

## **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КУЗНЕЧНОЙ ОПЕРАЦИИ ПРОТЯЖКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СХЕМЫ ДЕФОРМАЦИИ «ПРОХОДАМИ»**

В статье рассмотрены результаты математического моделирования пластического формоизменения при выполнении кузнечной операции протяжки на молоте при использовании схемы деформации «проходами». Выполнен анализ влияния параметров напряженно-деформированного состояния и температуры на качество получаемой кованной поковки. Установлено, что избежать несимметричного распределения параметров напряженно-деформированного состояния возможно за счет предварительно наведенного неравномерного распределения этих же величин предварительным деформированием, т.е. подготовкой заготовки перед протяжкой.

**Ключевые слова:** поковка, свойства, зависимость, ковка, заготовка, инструмент, качество.

**Введение.** Кузнечная операция «протяжка» является одной из наиболее используемых при производстве кованных поволоков. При этом существует масса исследований, которые проводят ее анализ по настолько многим аспектам, что и казалось бы еще нового можно добавить к ее рассмотрению. В частности, в [1] показаны результаты компьютерных расчетов напряжений, возникающих в поковках квадратного поперечного сечения при протяжке. Показано, что схема напряженного состояния способствует появлению внутренних разрушений в поковках при ковке. При этом в работе [2] рассматриваются вопросы влияния технологических факторов на течение металла при кузнечной протяжке бойками, обеспечивающими дополнительные деформации сдвига в поперечной плоскости заготовки. Проведенное планирование эксперимента для образцов с координатной решеткой позволило выявить среди этих факторов наиболее существенные и получить уравнение, описывающее их связь с углом закручивания волокна относительно продольной оси заготовки. Результатами этих и других работ являются работы по оптимизации всего процесса протяжки [3] и разработка в целом в [4] системы управления качеством проектирования технологических процессовковки.

Однако, как это часто случается, при множестве мнений до сих пор нет однозначного ответа – как все же ее вести для получения наиболее качественного продукта – поковки. Существует несколько схем протяжки (кузнечной вытяжки). Каждая из них реализуется при использовании основных технологических параметров. Такими параметрами являются:

- величина подачи (как абсолютная, так и относительная);
- фактор формы заготовки;
- величина единичного обжатия;
- величина укова при деформации;
- способ приложения деформирующей силы и т.д.

**Задачей данного исследования** является оценка результатов математического моделирования процесса протяжки при свободной ковке на молоте с применением бойков плоской формы.

**Цель работы** состоит в том, что все приведенные факторы реализуются на каком-то одном оборудовании с одновременным выбором схемы протяжки (в которой и реализуются все приведенные параметры). Здесь необходимо отметить, что разнообразие всех схем протяжки обычно сводится к одной, которую и реализует сам кузнец на рабочем месте. На данном этапе исследований мы не можем однозначно указать кузнецу, какую все же схему протяжки необходимо предпочесть в том или ином случае. Это связано с тем, что уровень механизации и автоматизации процессаковки все еще находится в руках самого кузнеца, который и выбирает ту схему протяжки, которая ему знакома. В связи с этим возникает необходимость на основе знаний различия применения различных схем протяжки обоснованно предлагать одну из них для получения требуемого качества кованного изделия. В этой работе целью исследования ставилось определение показателей напряженно-деформированного состояния при реализации схемы протяжки «проходами» путем математического моделирования в программном продукте «FORGE2008», которые практически невозможно получить проведением непосредственного экспериментального исследования в производственных условиях.

Для дальнейшего теоретического исследования формоизменения металла была выбрана программа компьютерного моделирования «Forge2008» фирмы «Transvalor» (Франция). Исследования проводились совместно с сотрудниками Ченстоховского политехнического университета в рамках договора о сотрудничестве с НМетАУ.

Описание модели процесса формоизменения при моделировании поставленной задачи: используется закон трения Амонтона; принимается

теория пластического течения несжимаемых сред Сен-Венана–Леви–Мизеса; задача считается трехмерной.

Для получения решения в программе «Forge 3» используется условие стационарности функционала смешанного вариационного принципа:

$$J = \frac{1}{2} \int_V \sigma_S \dot{\varepsilon}_j dV + \int_V \sigma \dot{\varepsilon}_0 dV - \int_F \sigma_\tau u_\tau dF, \quad (1)$$

где  $\sigma_S(\varepsilon_i, \varepsilon_j, t)$  – зависимость напряжения текучести  $\sigma_S$  от интенсивности скорости деформации  $\varepsilon_i$ , интенсивности деформации  $\varepsilon_j$ , и температуры  $t$ ;  $V$  – объем металла;  $\sigma_\tau$  и  $u_\tau$  – напряжение трения и скорость скольжения металла по инструменту;  $F$  – поверхность контакта металла с инструментом.

Зависимость  $\sigma_S(\varepsilon_i, \varepsilon_j, t)$  выбирается для конкретных материалов из литературных данных или по результатам пластометрических испытаний.

В программе используются конечные элементы в виде тетраэдров с линейной аппроксимацией среднего напряжения и кусочно-линейной аппроксимацией скорости (по угловым узлам элемента и узлу в центре тяжести элемента) [5].

В качестве исходных данных были выбраны следующие показатели: температура нагрева заготовки:  $T=1200^\circ\text{C}$ ; температура инструмента:  $T=20^\circ\text{C}$ ; размеры заготовки:  $H_3=20$  мм,  $B_3=20$  мм;  $L_3 = 100$  мм; скорость опускания инструмента:  $V=6$  м/с; марка стали заготовки: Ст. 20.

Следует отметить, что самой простой по форме и самой же используемой формой бойков является форма плоских бойков. Для возможности исключения такого параметра, как неравномерность деформации, которая обусловлена различием формы инструмента и формы заготовки, то в качестве исходной была выбрана заготовка с квадратным сечением, т.е. форма инструмента и заготовки были подобны и прямолинейны в начале формоизменения при протяжке. Далее определяющим параметром является величина подачи, которая также была выбрана в интервале рекомендуемой и составляла 0,4 от ширины бойка. Следующим параметром из заявленных была степень единичного обжатия. Эти параметры и были выбраны в качестве исходных. Теперь рассмотрим результаты математического моделирования протяжки и параметры напряженно-деформированного состояния и распределения температуры по проходам.

Перейдем к рассмотрению и анализу параметров напряженно-деформированного состояния. Таких параметров, как распределение относительной истинной (логарифмической) деформации и распределение нормальных напряжений, возникающих в поперечном и продольном сечениях заготовки по переходам и обжатиям. Для полноты картины мы рассмотрим

также зоны распределения температур по этим же сечениям. Тут следует отметить, что при моделировании принимался равномерный прогрев заготовки, и начальная температура металла перед деформацией составляла 1180 °С.

Первый проход. Всего было 3 обжатия (рис.1 и 2).

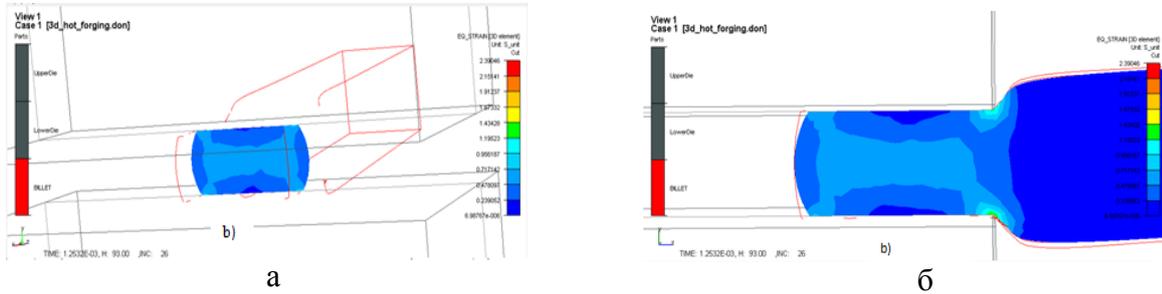


Рис. 1 – Распределение деформаций в 1 проходе и 1 обжатии:  
а – в поперечном сечении. б – в продольном сечении

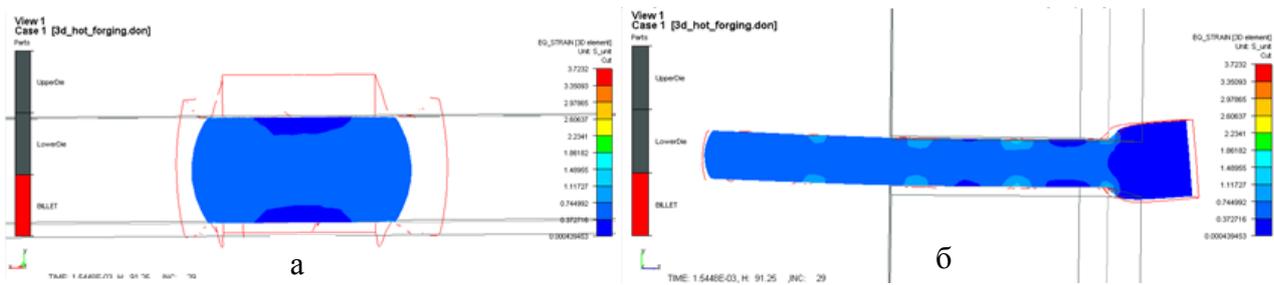


Рис. 2 – Распределение деформаций в 1 проходе и 3 обжатии:  
а – в поперечном сечении. б – в продольном сечении

Второй проход (первое обжатие после кантовки на 90°). Всего было 5 обжатий (рис. 3).

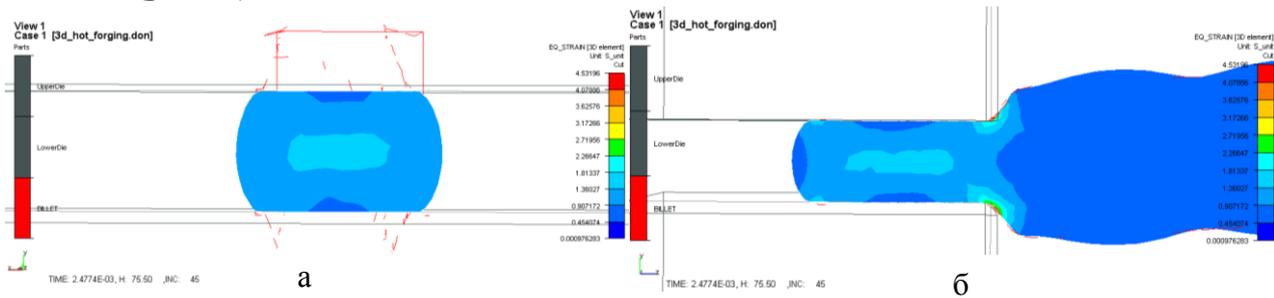


Рис. 3 – Распределение деформаций во 2 проходе и 1 обжатии:  
а – в поперечном сечении. б – в продольном сечении

Третий проход. Всего было 6 обжатий (рис.4).

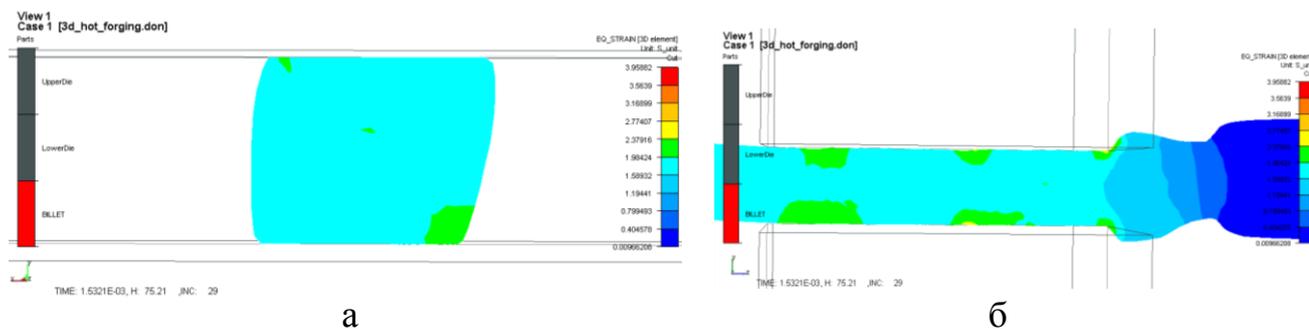


Рис. 4 – Распределение деформаций в 3 проходе и 6 обжати: а – в поперечном сечении. б – в продольном сечении.

По полученным параметрам напряженно-деформированного состояния (нормальных напряжений и логарифмической деформации) и температуры по проходам (с учетом промежуточной кантовки между проходами на  $90^{\circ}$ ) можно проследить изменение указанных параметров. Можно отметить, что при первом обжати в первом проходе наблюдается все процессы, которые характерны для простого процесса осадки, но с наличием одной внешней зоны со стороны заднего конца. Видна характерная зона прилипания и зональное распределение деформаций с максимальной деформацией в центральных слоях заготовки. Такое распределение, как известно, с одной стороны характеризует значительную неравномерность деформации, но, с другой стороны, обеспечивает максимальную проработку центральной (наиболее дефектной) части заготовки. Эта же тенденция наблюдается и в последующих обжатиях этого прохода. Тут прослеживается также наличие остаточных напряжений и деформаций в уже продеформированном металле, что наиболее прослеживается в продольном сечении заготовки.

Во втором проходе следует разделить рассмотрение первого и последующих обжатий. Напомню, что после последнего обжатия заготовка кантуется на  $90^{\circ}$  и обжатия начинаются с переднего конца заготовки. При первом обжати во втором проходе происходит такие же явления, которые были характерны для первого обжатия первого прохода, т.е. практически мы продолжаем наблюдать осадку. Различия начинают прослеживаться на последующих обжатиях второго прохода. Это связано с тем, что мы должны не забывать, что мы уже имеем предварительно продеформированный металл, но и это не главное. Главное то, что кроме неравномерности деформации обусловленной наличием трения на контакте (от этого мы не можем избавиться), но еще вступает и второй фактор обуславливающий неравномерность деформации, а именно различие формы инструмента и заготовки. Это является следствием того, что заготовка была продеформированна и скантована и на боковой поверхности мы имеем то же,

что и простом процессе осадки – бочкообразность боковой поверхности. И это обуславливает то, что у нас резко изменяется и теряет симметричность распределение напряжений, деформаций и температуры в поперечном сечении. При этом в продольном направлении распределение всех исследуемых параметров имеет схожий характер с первым проходом.

Наибольший интерес представляет последний третий проход. Мы опять после второго прохода выполняем кантовку на  $90^\circ$ . И теперь начинаются те явления, которые характерны именно для операции протяжки, а именно в поперечном сечении получается, как бы кручение заготовки относительно центральной зоны. Заготовку начинает крутить. Возникает неравномерность деформации, которая характерна именно для протяжки (такое распределение деформации при осадке вы практически никогда не можете получить – да оно и нежелательно). Наблюдается кручение заготовки и необходима правка – иначе поковка приобретает явно нелинейный характер. Что именно и делается в производственных условиях. Но чем это чревато для напряженно-деформированного состояния? А именно тем, что несмотря на полученную прямолинейную форму поковки (в производственных условиях после правки) в сечении заготовки мы получаем явно выраженное неравномерное распределение напряжений и деформаций, которое в довершение всего не имеет оси симметрии, т.е. явно выраженную анизотропию (если коснуться свойств металла и его качества). Это же подтверждает распределение указанных величин в продольном направлении.

**Выводы.** Значение кузнечной операции протяжки сложно переоценить – это одна из основных операцийковки. И она является единственной операциейковки, которая позволяет путем последовательных обжатий заготовки выполнять значительные вытяжки поперечного сечения при одновременном увеличении длины заготовки. Но в поперечном и продольном сечении наблюдается кручение заготовки (которое в принципе исправимо правкой заготовки), которое приводит к значительной неравномерности деформации, обусловленной не только наличием трения на инструменте, но и возникающего различия формы инструмента и заготовки (при начальном их соответствии) вследствие характерной для протяжки кантовки предварительно протянутой заготовки. Избежать настолько выраженного и несимметричного распределения параметров напряженно-деформированного состояния возможно за счет предварительно наведенного неравномерного распределения этих же величин предварительным деформированием, т.е. подготовкой заготовки перед протяжкой. Эта подготовка состоит уже в использовании известной схемы деформации с предварительной осадкой. Основная задача дальнейших

исследований состоит в том, чтобы рассматривать и определять оптимальное сочетание параметров осадки и последующей протяжки для получения качественной кованной поковки.

**Список литературы:** 1. Фомичев А.Ф., Юргенсон Э.Е., Салиенко А.Е., Стыров В.В. Исследование возможности возникновения внутренних разрушений в поковках при кузнечной протяжке // *Металлообработка*. – № 2. – 2007. – с. 27–28. 2. Залесский В. И., Тюрин В. А., Экарев М. С. Влияние дополнительного сдвига при кузнечной протяжке на распределение деформаций в заготовке // *Труды Московского института стали и сплавов: Научные труды МИСиС*. – М.: *Металлургия*. – Вып. 113: Новые технологические процессы обработки металлов давлением: Сб. статей / МИСиС – М.: *Металлургия*, 1979. – с.76–81. 3. Назарьян В.А., Маракушина О.М. Оптимизация процесса кузнечной протяжки // *Кузнечно-штамповочное производство*. – №4. – 1998. – с. 22–30. 4. Система управления качеством проектирования технологических процессовковки // Трубин В.Н. и др. / М. – *Машиностроение*. – 1984. – 234с. 5. Forge 3 – a general tool for practical optimization of forging sequence of complex three-dimensional parts in industry / Chenot J. L., Fourment L., Coupez T., Ducloux R., Wey E. // *Forging and Related Technology*. – Birmingham, (UK). – 1998. – P. 113–122.

**Bibliography (transliterated):** 1. Fomichev A.F., Yurgenson `E.E., Salienko A.E., Styrov V.V. Issledovanie vozmozhnosti vzniknoveniya vnutrennih razrushenij v pokovkah pri kuznechnoj protyazhke *MetallООbrabotka*. – No 2. – 2007. – P. 27–28. 2. Zaleskij V. I., Tyurin V. A., `Ekarev M. S. Vliyanie dopolnitelnogo sdviga pri kuznechnoj protyazhke na raspredelenie deformacij v zagotovke *Trudy Moskovskogo instituta stali i splavov: Nauchnye trudy MISiP*. – Moskow: *Metallurgiya*. – Vyp. 113: Novye tehnologicheskie processy obrabotki metallov davleniem: Sb. statej MISiS – Moskow: *Metallurgiya*, 1979. – P.76-81. 3. Nazar'yan V.A., Marakushina O.M. Optimizaciya processa kuznechnoj protyazhki *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*. – No4. – 1998. – P. 22-30. 4. Sistema upravleniya kachestvom proektirovaniya tehnologicheskikh processov kovki Trubin V.N. i dr. *Moskow – Mashinostroenie*. – 1984. – 234P. 5. Forge 3 – a general tool for practical optimization of forging sequence of complex three-dimensional parts in industry *Chenot J. L., Fourment L., Coupez T., Ducloux R., Wey E. Forging and Related Technology*. – Birmingham, (UK). – 1998. – P. 113–122.

Поступила (received) 28.10.2014

УДК 621.7

**Я. Г. ЖБАНКОВ**, канд. техн. наук, доц., ДГМА, Краматорск

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА В ПРОЦЕССЕ ГОРЯЧЕГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Предложен метод моделирования микроструктуры металла в процессе горячего пластического деформирования. На основе метода конечных элементов проведено моделирование процесса осадки заготовки плоскими плитами. Получено распределение величины размера зерна в поперечном сечении поковки полученной осадкой. Анализ результатов расчета позволяет сделать вывод о том, что в поковке полученной осадкой в области зоны затрудненных деформаций зерно металла будет крупнее нежели в центральной части поковки.

**Ключевые слова:** микроструктура, деформирования, моделирование, рекристаллизация, методика, осадка, метод конечных элементов.

**Введение.** Получение качественных изделий является одним из основных направлений развития современного производства. Особенно это важно для