

УДК 539.3

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦАХ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ СДВИГОМ ПОД ДАВЛЕНИЕМ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© Н.В. Камышанченко, Т.Б. Никуличева, И.С. Никулин,
А.В. Кузнецов, В.В. Красильников, А.В. Яковлев

Ключевые слова: метод конечных элементов; наковальни Бриджмена; напряженно-деформированное состояние; модель Джонсона–Кука.

В работе представлены результаты математического моделирования упруго-вязкопластического деформирования в процессе интенсивной пластической деформации кручением низкоуглеродистых стальных образцов, осуществляемого с помощью наковален Бриджмена. Для задания реологических свойств модели в качестве исследуемого материала была выбрана сталь 08кп. Рассмотрено влияние на формирование неоднородной структуры вдоль радиуса образца двух таких важных параметров, как степень деформации и угол кручения. Результаты исследования получены при выполнении конечно-элементного моделирования в программном комплексе DEFORM 3D.

Метод интенсивной пластической деформации (ИПД) представляет большой интерес, прежде всего из-за возможности эффективно управлять прочностными характеристиками конструкционных сталей при сохранении достаточно высокого уровня пластичности [1]. Одним из основных методов ИПД, позволяющим достичь больших деформаций материалов при относительно низких гомологических температурах, а также определить оптимальные режимы обработки материалов, является деформация кручением под высоким давлением с помощью наковален Бриджмена [2]. Однако результаты эксперимента с использованием метода ИПД не позволяют определить величину пластической деформации в любой выбранной точке в геометрических пределах образца. Эта проблема может быть легко решена с помощью конечно-элементного моделирования [3–5]. В данной работе рассматривается упруго-вязкопластическая деформация в процессе ИПД кручением стальных образцов (сталь 08кп) методом конечных элементов. Исследуется влияние двух таких важных параметров, как степень деформации и угол кручения. Особое внимание уделяется анализу распределения пластической деформации, что позволяет понять механизмы деформации и оптимизировать процесс ИПД кручением.

Метод ИПД кручением под давлением (рис. 1) представляет собой процесс, при котором формирование субмикроструктурных и нанокристаллических структур, с размером зерен до 0,1 мкм и менее, в объемных образцах достигается за счет применения высокого квазигидростатического давления с помощью сжатия на наковальнях Бриджмена [2]. Образец помещается между бойками и сжимается под приложенным давлением P в несколько ГПа. Нижний боек вращается, и силы поверхностного трения заставляют образец деформироваться сдвигом. Геометрическая форма образцов такова, что основной объем материала деформируется в условиях квазигидростатического сжатия

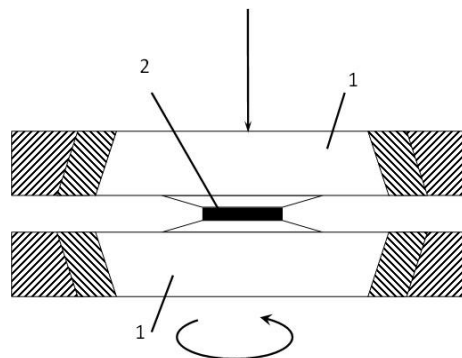


Рис. 1. Схема деформации на наковальне Бриджмена: 1 – боек; 2 – сжимаемый образец

под действием приложенного давления и давления со стороны внешних слоев образца. В результате деформируемый образец, несмотря на большие степени деформации, не разрушается [1; 6–7].

Экспериментальные исследования [1–2; 6; 8] показывают, что микроструктурные изменения в объеме образца, протекающие в процессе ИПД кручением, носят нелинейный характер в зависимости от таких внешних параметров, как температура, скорость деформации и гидростатическое давление.

Это необходимо принимать во внимание при математическом описании процесса пластической деформации.

В настоящее время для решения задач механики деформируемого твердого тела численными методами, в частности, методом конечных элементов, используется ряд специализированных программных продуктов. В данной работе математическое моделирование процесса ИПД кручением проводилось методом конечных элементов с использованием программного комплекса

Deform 3D, предназначенного для анализа процессов обработки металлов давлением.

Экспериментальные исследования [1–2; 6; 8] выдвигают следующие требования к конечно-элементной модели:

1) модель сжимаемого образца должна допускать локализацию сдвиговых деформаций в направлении толщины пластины;

2) модель должна описывать процесс деформации, не допуская ее разрушения, чтобы не вызывать дефект массы.

С учетом сформулированных требований для численного моделирования процесса ИПД кручением с получением реалистичной картины деформированного состояния была построена конечно-элементная модель (рис. 2). Размеры исследуемого образца: диски диаметром 1,6 мм и толщиной 2,0 мм. Модель образца была разбита на элементы тетрагональной формы, общее количество элементов составило 15000 шт. При таком разбиении средний размер конечного элемента составил 0,009 мм (рис. 2). Температура в начале деформации принималась равной 20 °С и одинаковой по всей заготовке. Диаметр бойков – 2,5 мм. Для образца тип объекта устанавливался как пластичное тело, рабочий инструмент – как недеформируемое жесткое тело. Перемещение бойков складывалось из двух компонент: постоянного продольного перемещения с определенной скоростью верхнего бойка, имитирующего сжатие образца, и вращения нижнего.

Для корректного моделирования необходимо задать механические характеристики материалов при соответствующих скоростях нагружения. В качестве исследуемого материала была выбрана сталь 08кп. Экспериментальная кривая напряжение – деформация для данного материала показана на рис. 3. Видно, что процесс является нелинейным с очевидным переходом от упругой стадии деформации к пластической.

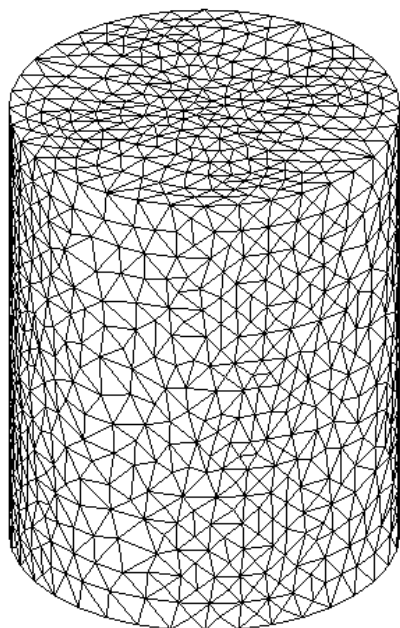


Рис. 2. Конечно-элементная сетка образца в начале анализа процесса ИПД

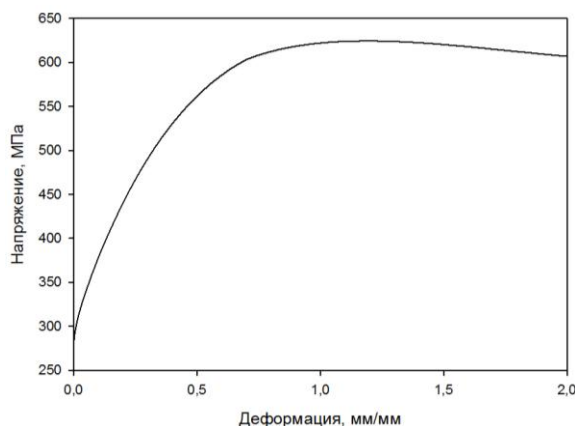


Рис. 3. Кривая напряжение – деформация для стали 08кп

Для описания зависимости предела текучести от температуры, скорости деформирования и накопленной пластической деформации использовалась модель Джонсона–Кука [9]:

$$\bar{\sigma} = (A + B\bar{\epsilon}^n) \left(1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \right) \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right)^\alpha \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right), \quad (1)$$

где $\bar{\sigma}$ – предел текучести; $\bar{\epsilon}$ – эффективная пластическая деформация; $\dot{\bar{\epsilon}}$ – эффективная скорость пластической деформации; T_m – температура плавления; T_r – комнатная температура; A , B , C , n , m , α – константы материала.

Степень деформации определялась выражением:

$$\epsilon = \ln \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\varphi r}{h} \right)^2} \right) + \ln \left(\frac{h_0}{h} \right), \quad (2)$$

где $\varphi = 2\pi N$ – угол поворота бойка, N – число оборотов бойка за один непрерывный цикл деформации; r – расстояние от центра образца; h_0 и h – начальная и конечная толщины образца.

Поскольку изменение механических свойств материала непосредственно связано с процессом пластической деформации, протекающей в образце, ниже проведен анализ накопленных деформаций. На рис. 4 показано распределение деформации по критерию Мизеса от времени деформации для различных материальных точек вдоль радиуса образца. Можно выделить две стадии пластической деформации: I – когда основной вклад в процесс деформации вносит деформация за счет сжатия (до 40 %), II – основной вклад вносит деформация за счет кручения (выше 40 %). Видно, что величина пластической деформации возрастает от центра к периферии образца.

На рис. 5 представлено распределение деформации по критерию Мизеса вдоль радиуса образца при деформации 50 % в зависимости от угла кручения. Видно, что распределение накопленной деформации становится более однородным вдоль радиуса образца с увеличением угла кручения, и значение деформации в центре образца оказывается максимальным.

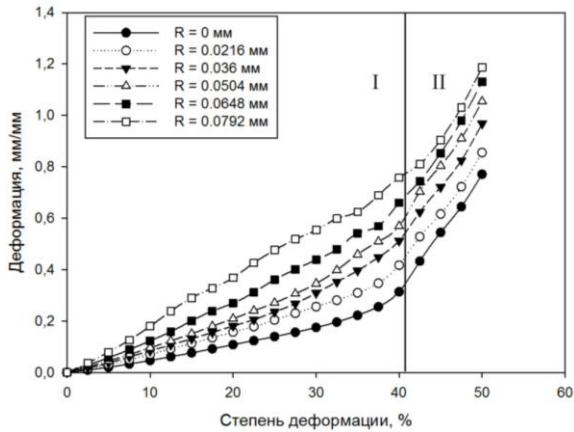


Рис. 4. Значение деформации по критерию Мизеса от степени деформации в различных точках вдоль радиуса образца

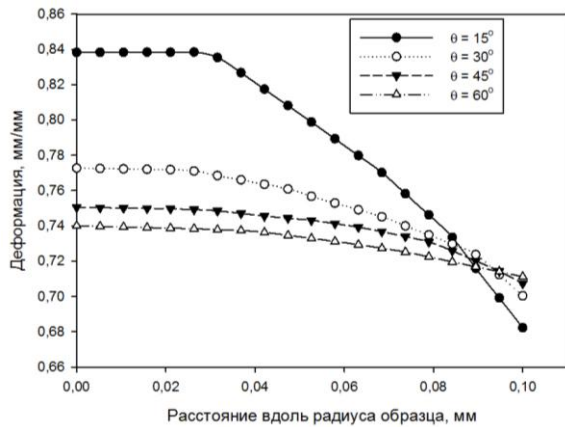


Рис. 5. Значение деформации по критерию Мизеса вдоль радиуса образца для различных углов кручения

На рис. 6 показаны контурные графики деформации образца после процесса ИПД на 50 % без кручения (рис. 6а) и с кручением нижнего бойка на угол $\theta = 60^\circ$ (рис. 6б). При анализе пластической деформации, вызванной сжатием, удобно разделить образец на три зоны, как показано на рис. 6а. В зонах I и III распределение пластической деформации аналогично, и значе-

ние деформации в центре зоны ниже по сравнению с периферией. В зоне II распределение деформации носит противоположный характер и не превышает 0,905 мм/мм. При ИПД с кручением (рис. 6б) в зоне III область однородной пластической деформации становится шире, соответствует 0,769 мм/мм. В центральной части зоны II значение деформации выше, чем в зоне I из-за трения при кручении нижнего бойка.

На рис. 7 представлено распределение деформации по критерию Мизеса вдоль радиуса образца для различных степеней деформации при угле кручения $\theta = 60^\circ$.

Видно, что пластическая деформация, а также разница между максимальным и минимальным значениями возрастает при увеличении степени деформации. Отсюда можно сделать предположение, что чем больше степень деформации, тем больше неоднородность распределения пластической деформации. В то же время зона одинаковых значений деформации увеличилась от 0,02 мм при $\epsilon = 10\%$ до 0,04 мм при $\epsilon = 50\%$ (от центра к периферии). Таким образом, для того чтобы получить более однородную область пластической деформации, рекомендуется использовать большие степени сжатия в сочетании с большим углом кручения.

Изучение поведения деформации при различных скоростях деформации играет важную роль, т. к. механические свойства и механизмы деформации в значительной степени зависят от приложенной скорости деформации [1]. На рис. 8 показаны контурные графики распределения скорости деформации образца после процесса ИПД на 50 % в случае сжатия без кручения (рис. 8а), и в случае сжатия с кручением нижнего бойка на угол $\theta = 60^\circ$ (рис. 8б). При сжатии без кручения (рис. 8а) видно, что максимальный уровень скорости деформации находится в центре образца. В случае сжатия с кручением (рис. 8б) видно, что область периферии течет быстрее, чем центральная. Кроме того, очевидно, что эволюция скорости пластической деформации при простом сжатии, по существу, отличается от сжатия с кручением. Поэтому при ИПД с большим углом кручения необходим анализ микроструктуры обрабатываемого образца.

На рис. 9 показаны контурные графики средних главных напряжений образца после процесса ИПД на 50 %. При деформации без кручения (рис. 9а) главные напряжения, наблюдаемые в образце, являются сжимающими. Максимальное значение находится на внешней кромке образца (зона А). При деформации с круче-

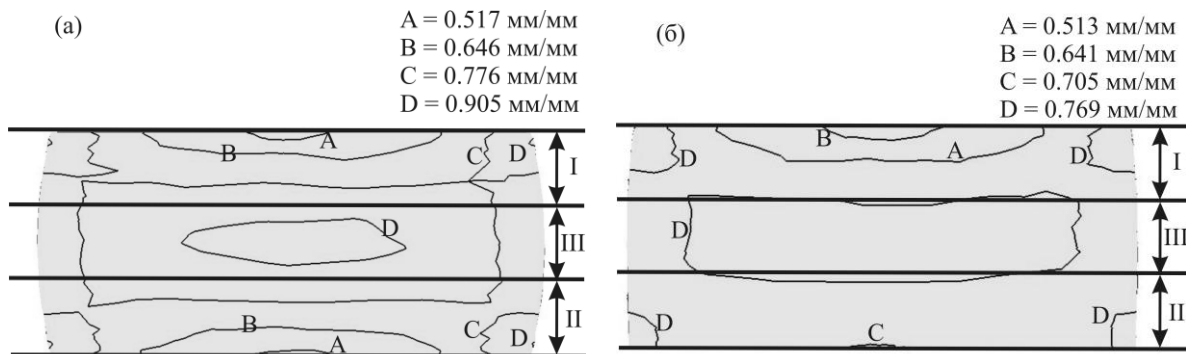


Рис. 6. Распределение деформации по критерию Мизеса при ИПД на 50 %: а) сжатие без кручения; б) сжатие с кручением на угол $\theta = 60^\circ$

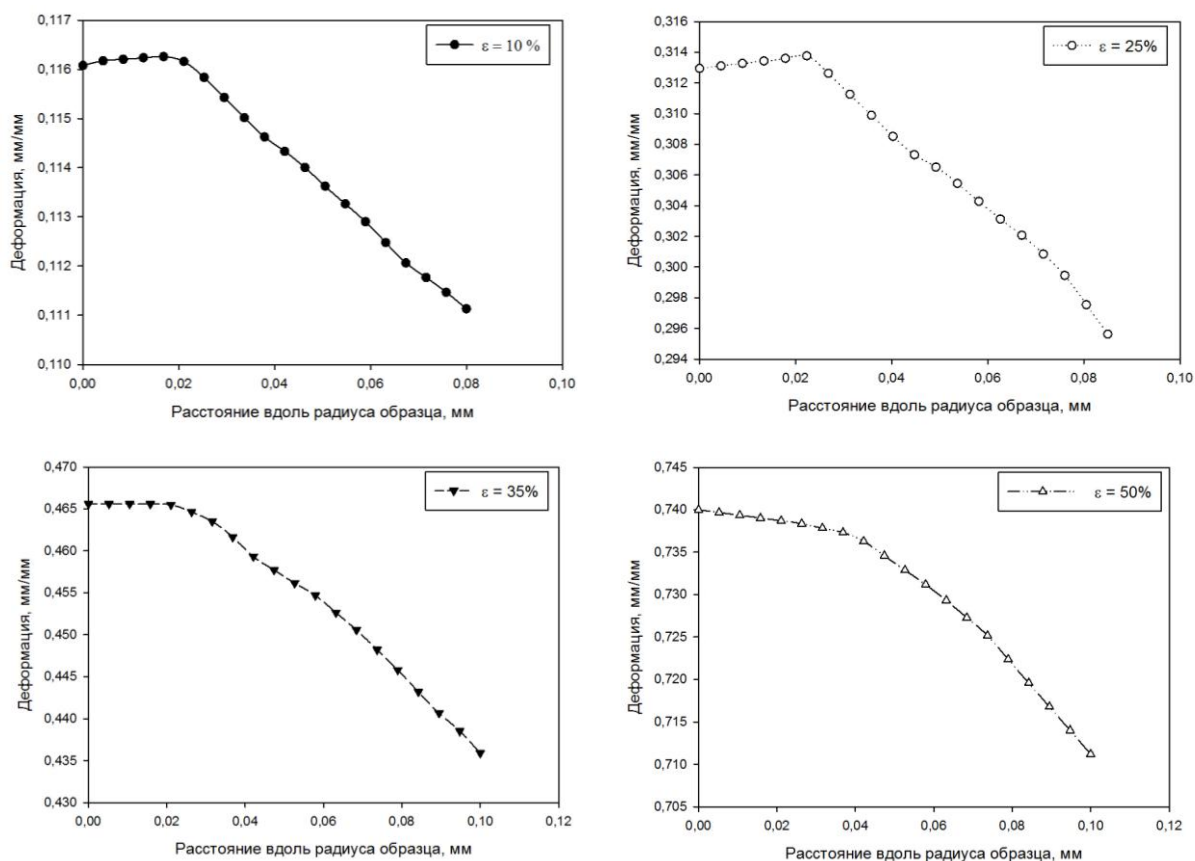


Рис. 7. Значение деформации по критерию Мизеса вдоль радиуса образца для различных степеней деформации

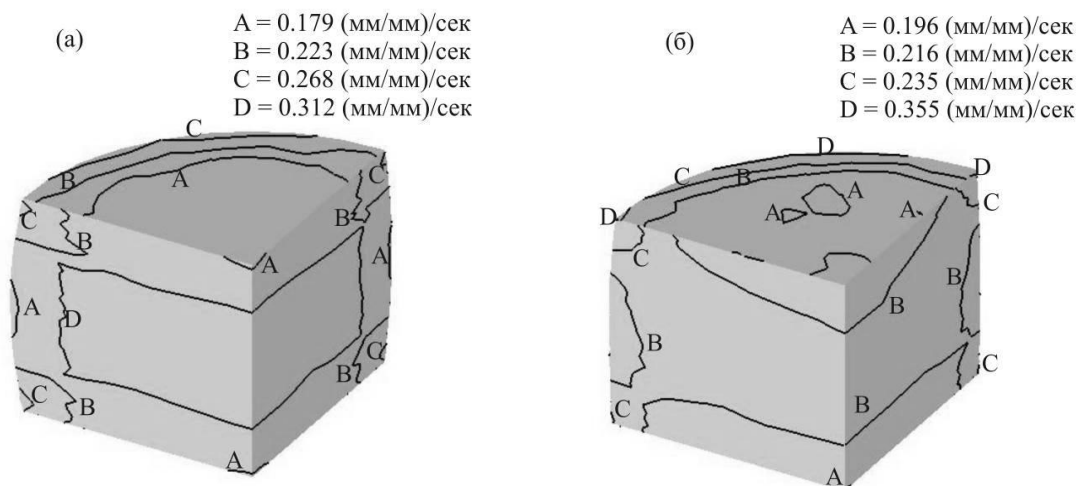


Рис. 8. Распределение скорости деформации при ИПД образца на 50%: а) сжатие без кручения; б) сжатие с кручением на угол $\theta = 60^\circ$

нием на угол $\theta = 60^\circ$ (рис. 9б) на периферии образца наблюдается область растягивающих напряжений (зона С), а область сжимающих напряжений стала шире (зона В).

Кроме того, можно отметить, что разница между максимальным и минимальным значениями средних главных напряжений в случае сжатия с кручением

уменьшилась. Это позволяет предположить, что увеличение угла кручения приведет к однородности распределения напряжений в образце. Следует отметить, что процесс упруго-вязкопластической деформации при ИПД не является идентичным для различных материалов, а параметры процесса, такие как степень деформации, угол кручения, скорость деформации и температу-

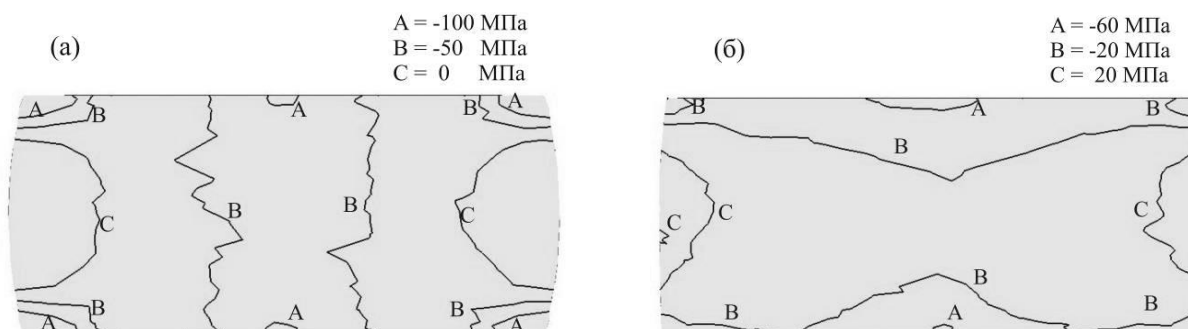


Рис. 9. Распределение средних главных напряжений при ИПД образца на 50 %: а) сжатие без кручения; б) сжатие с кручением на угол $\theta = 60^\circ$

ра, должны быть дополнительно исследованы при одновременном исследовании микроструктуры образцов.

ВЫВОДЫ

Проведен анализ упруго-вязкопластической деформации в процессе ИПД кручением стальных образцов (сталь 08кп) методом конечных элементов.

Показано, что пластическая деформация в центре образца выше, чем на периферии. Это может быть связано, с одной стороны, с более высоким уровнем напряжения в центре образца, а с другой стороны, с неоднородностью распределения скорости деформации. В то же время зона одинаковых значений деформации увеличилась от центра к периферии.

Определено, что для получения более однородного распределения напряжений в объеме заготовки рекомендуется использовать большие степени сжатия в сочетании с большим углом кручения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Валиев Р.З., Александров И.В.* Объемные наноструктурные металлические материалы. М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. 398 с.
2. *Смирнова Н.А., Левит Б.И., Пилюгин В.И., Кузнецов Р.И., Давыдова Л.С., Сазонова Б.А.* Эволюция структуры ГЦК монокристаллов при больших пластических деформациях // Физика металлов и металловедение. 1986. Т. 61. № 6. С. 1170-1177.
3. *Kim H.S., Hong S.I., Lee Y.S., Dubravina A.A., Alexandrov I.V.* Deformation behavior of copper during a high pressure torsion process // J. Mater. Process. Technol. 2003. V. 142. P. 334-337.
4. *Yoon S.C., Horita Z., Kim H.S.* Finite element analysis of plastic deformation behavior during high pressure torsion processing // J. Mater. Process. Technol. 2008. V. 201: P. 32-36.

5. *Zeynali E., Bisadi H.* Comparing plastic deformations produced by HPT and ECAP processes using the finite element analysis method // International Journal of Mechanics and Applications. 2012. V. 2 (1). P. 20-24.
6. *Valiev R.Z., Langdon T.G.* Principles of equal channel angular pressing as a processing tool for grain refinement // Prog. Mater. Sci. 2006. V. 51. P. 881.
7. *Saito Y., Tsuji N., Utsunomiya H., Sakai T., Hong R.G.* Ultra-fine grained bulk aluminum produced by accumulative roll-bonding (ARB) process // Scripta Mater. 1998. V. 39. P. 1221.
8. *Валиев Р.З., Зарунов Н.Г., Карасаева М.В., Нуреева С.К.* Получение уникальных механических свойств углеродистой стали 45 за счет интенсивной пластической деформации // Научные ведомости БелГУ. Серия: Математика. Физика. 2011. № 11 (106). Вып. 23. С. 129-133.
9. *Johnson G.R., Cook W.H.* A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Proc. of 7th Symposium on Ballistics. Hague, Netherlands, 1983. P. 541-547.

Поступила в редакцию 17 апреля 2015 г.

Kamyshanchenko N.V., Nikulicheva T.B., Nikulin I.S., Kuznetsov A.V., Krasilynikov V.V., Yakovlev A.V. THE STRESS-STRAIN ANALYSIS OF STEEL SAMPLE STATE AT SHEAR DEFORMATION UNDER PRESSURE USING MATHEMATICAL MODELING

The results of mathematical modeling of the elastic-viscoplastic deforming low carbon steel samples under intensive plastic torsion deformation by Bridgman anvils in this work are given. 08kp steel has been taken as a material investigated to assign rheological model features. Effect of two important parameters such as degree of deformation and torsion angle on formation of inhomogeneous structure along a sample radius is considered. Investigation results are obtained by the program DEFORM 3D for finite element modeling in program complex.

Key words: finite element method; Bridgman anvils; stress-strain state; Johnson-Cook model.

Камышанченко Николай Васильевич, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры общей и прикладной физики, e-mail: kamysh@bsu.edu.ru

Kamyshanchenko Nikolay Vasilyevich, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Professor of General and Applied Physics Department, e-mail: kamysh@bsu.edu.ru

Никulichева Татьяна Борисовна, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры материаловедения и нанотехнологий, e-mail: nikulicheva@bsu.edu.ru

Nikulicheva Tatyana Borisovna, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor of Material Studies and Nanotechnologies Department, e-mail: nikulicheva@bsu.edu.ru

Никулин Иван Сергеевич, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры материаловедения и нанотехнологий, e-mail: nikulin@bsu.edu.ru

Nikulin Ivan Sergeevich, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation, Candidate of Physics and Mathematics, Senior Lecturer of Material Studies and Nanotechnologies Department, e-mail: nikulin@bsu.edu.ru

Кузнецов Андрей Витальевич, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории объемных наноструктурных материалов, e-mail: kuznetsov@bsu.edu.ru

Kuznetsov Andrey Vitalyevich, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation, Candidate of Technics, Senior Scientific Worker of Axonometric Nanostructural Materials Department, e-mail: kuznetsov@bsu.edu.ru

Красильников Владимир Владимирович, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры материаловедения и нанотехнологий, старший научный сотрудник, e-mail: kras@bsu.edu.ru

Krasilynikov Vladimir Vladimirovich, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Professor of Material Studies and Nanotechnologies Department, Senior Scientific Worker, e-mail: kras@bsu.edu.ru

Яковлев Алексей Владимирович, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Yakovlev Aleksey Vladimirovich, Tambov State University of G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor of General Physics Department, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru