слов, В. П. Федоров. – М.: Машиностроение, 1979. – 176 с.

3. *Проников А. С.* Надежность машин. – М.: Машиностроение, 1978. – 591.

4. Принципы построения автоматических систем управления технологическими процессами изготовления изделий машиностроения / Полетаев В. А., Калачев М. А. // Вестник КузГТУ, 1998. – № 2. – С. 3-11.

□ Авторы статьи:

Полетаев
Вадим Алексеевич,
докт. техн. наук, зав. каф. информационных и автоматизированных производственных систем КузГТУ.
E-mail: pva@kuzstu.ru

Чичерин
Иван Владимирович,
канд. техн. наук, доцент каф. «Информационные и автоматизированные производственные системы» КузГТУ.
E-mail: chicivan@narod.ru

УДК 621.787: 621.789

М.В.Пимонов

ПРОГРАММА НАГРУЖЕНИЯ В ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ

В настоящее время всё большее применение находят наноструктурные материалы. В последние годы использование методов интенсивной пластической деформации становится одним из наиболее актуальных направлений для получения объёмных наноструктурных металлов и сплавов. Это обусловлено следующими факторами: получение равномерных беспористых наноструктур, большие габариты конечных изделий (для равноканального углового прессования и всесторонней изотермической ковки), а также простота технологической оснастки. Использование интенсивной пластической деформации позволяет повысить микротвердость титана в 1,9 раз, предел текучести более чем в 4 раза при сохранении удовлетворительной пластичности. В работе [1] чистую Cu (99,996 %) подвергали РКУП, полученные результаты представлены на рис.1. Здесь заметен не только рост прочности, достигающей рекордных значений для Cu, но и сохранение пластичности.

На сегодняшний день основными являются три способа интенсивной пластической деформации:

Всесторонняя изотермическая ковка принципиальная схема которой представлена на рис. 2., способ был разработан и используется для получения объемных наноструктурных полуфабрикатов из различных материалов. Ковка заготовки осуществляется в температурно-скоростных режимах, выбранных в ходе предварительных исследований. Схема всесторонней изотермической ковки способствует равномерному распределению деформации в объёме заготовки. Однако, в конечном счёте, равномерность развития рекристаллизационных процессов и соответственно однородность микроструктуры обеспечиваются как правильно выбранными температурно-скоростными условиями ковки, так и её схемой. Всесторонняя ковка ведётся до достижения 100% рекристаллизованного объёма.

Всесторонняя изотермическая ковка является универсальным методом, применимым не только к пластичным металлам и сплавам, но и к труднодеформируемым материалам [2].

При **деформация кручением под высоким давлением** (КВД) Благодаря «стеснённым» условиям деформации (высокому гидростатическому давлению) в материал удалось внести значительную энергию деформации и не допустить при этом его разрушения.

Деформационное наноструктурирование материалов методом КВД является простым методом, который позволяет получать наноструктуру с уменьшением размера зёрен до d = 10 – 20 нм [3, 4, 5]. Конструкция установки деформации кручением (рис. 3) Полученные таким образом образцы имеют форму дисков диаметром 10 – 20 мм и толщиной 0,2 – 0,5 мм. Этот метод используется чаще всего при получении нано-структурных образцов для исследования физических свойств.

При реализации **равноканального углового прессования** заготовка неоднократно продавливается в специальной оснастке через два канала с одинаковыми поперечными сечениями, пересекающимися обычно под углом 90°.

При необходимости, в случае труднодеформируемых материалов, деформация осуществляется при повышенных температурах или при увеличенных углах пересечения каналов. Для уменьшения контактного трения используется смазка.

Данным методом сильное измельчение микроструктуры может быть достигнуто относительно легко уже после одного или нескольких проходов, как в чистых металлах, так и в сплавах. Однако обеспечение формирования однородных УМЗ структур с большеугловыми границами зёрен методом РКУ-прессования требует заметно больше-

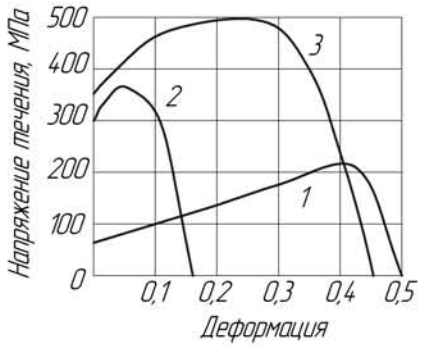


Рис. 1. Истинные кривые деформации для Cu (99,996 %)[1]. Кривая 1 – исходная крупнозернистая Cu с размером зерен около 30 мкм, кривая 2 – после холодной прокатки, кривая 3 – подвергнутой РКУП 16 проходов

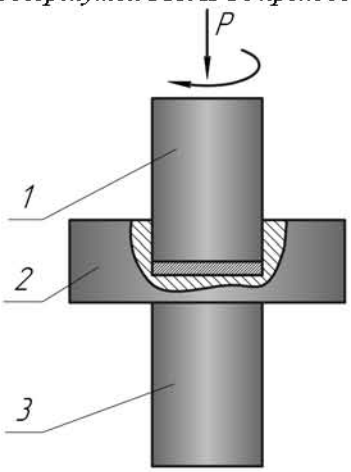


Рис. 3. Схема метода кручения под высоким давлением: 1-пуансон; 2-образец; 3-суппорт

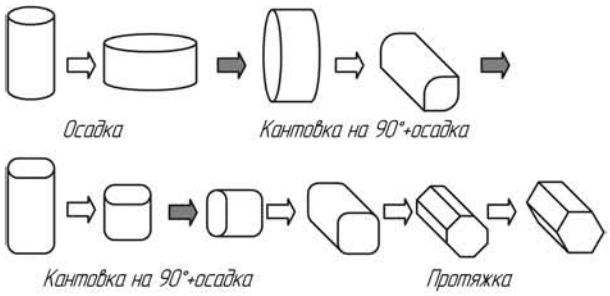


Рис. 2. Принципиальная схема всесторонней изотермической ковки

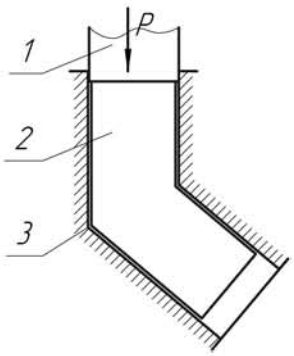


Рис. 4. Схема пластической деформации методом равноканального углового прессования: 1 – пуансон, 2 – заготовка, 3 – матрица[7].

го числа проходов (как правило, 8 и более).

Проводится изучение влияния режимов обработки на показатели структурного состояния и механические свойства материала, исследуются возможности совершенствования методов деформационного наноструктурирования с позиций расширения их технологических возможностей [1-7].

Однако до настоящего времени достаточно общих моделей, позволяющих оценивать структурное состояние металла по заданным режимам обработки, не предложено. Также остаются практически неизученными вопросы, связанные со стабильностью полученных структур, а значит и сохранения полученных механических свойств, в процессах эксплуатации.

Обеспечение эксплуатационных свойств требует выявления закономерностей влияния параметров технологии изготовления на эволюцию структурного состояния, как при обработке, так и на стадии эксплуатации.

В данной работе для описания закономерностей и создания методики проектирования технологических процессов используется аппарат механики технологического наследования [8].

Рассмотрение процесса упрочняющей обработки интенсивной пластической деформацией с точки зрения механики технологического наследования подразумевает решение нескольких задач:

- Определение влияния режимов обработки на конечную структуру материала;
- Разработка методов проектирования технологических процессов для получения заданной структуры, а вследствие этого определённых механических свойств материала;
- Определение закономерностей трансформации полученной структуры на стадии эксплуатации.

Обработка интенсивной пластической деформацией при данном подходе рассматривается как непрерывный процесс формирования и трансформации структурных свойств материала в очаге деформации, происходящий под действием программы нагружения.

Программа нагружения представляет собой диаграмму, построенную в осях «показатель напряжённого состояния Π – накопленная степень деформации сдвига Λ» и раскрывает физические

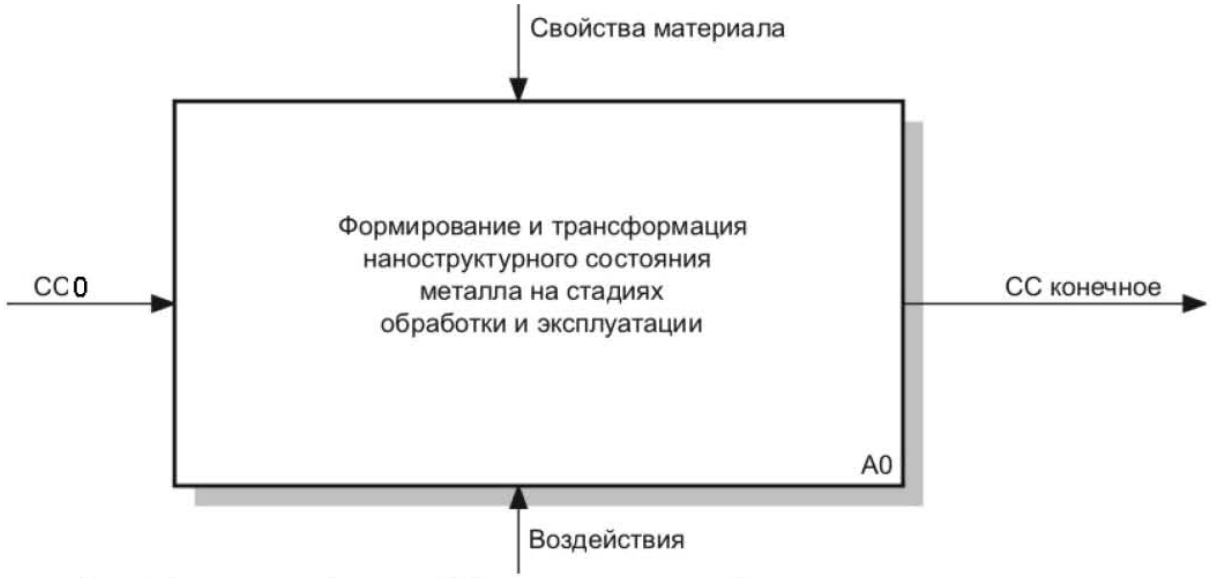


Рис. 5. Контекстная функция А0 формирования и трансформации структурного состояния металла в процессах обработки и эксплуатации

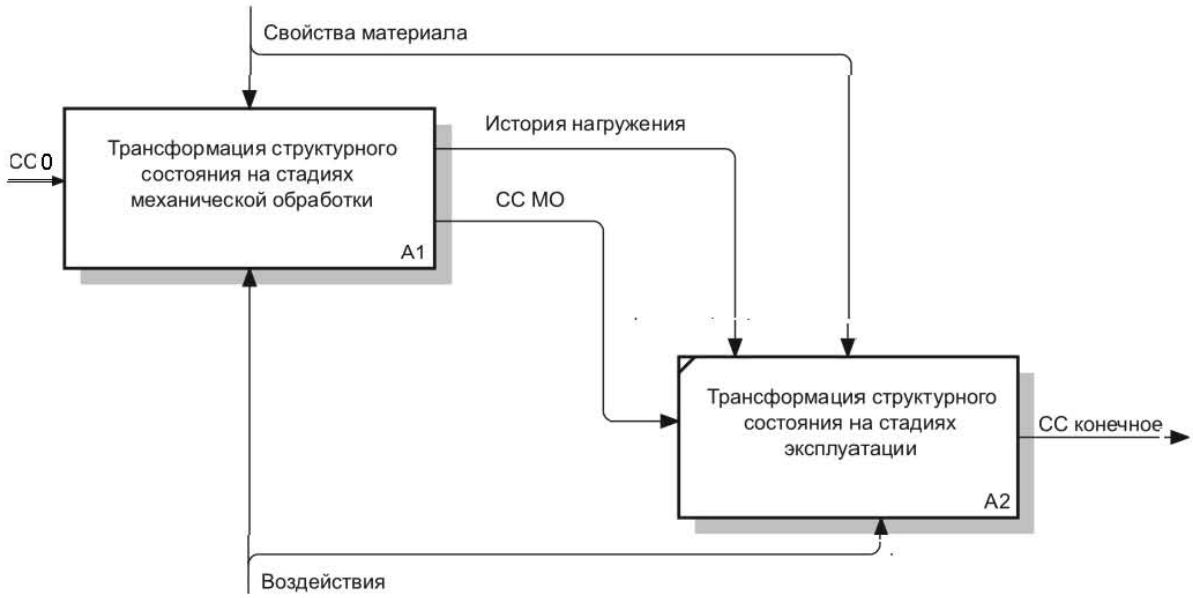


Рис. 6 Декомпозиция контекстной функции А0 – стадии нагружения

закономерности формирования и трансформации структурного состояния при механической обработки.

Программа нагружения является универсальным инструментом, так как позволяет независимо от параметров очага деформации (форма, привязка к осям) описывать закономерности пластического течения, которые и определяют формирование структурного состояния металла.

На рис. 5 показана контекстная функция модели формирования и трансформации структурного состояния металла в процессах обработки и эксплуатации (А0). Контекст модели подразумевает рассмотрение всех методов обработки, при которых возникает пластическое течение металла в области контакта индентора и обрабатываемой заготовки – очаге деформации. В качестве стадий эксплуатации могут рассматриваться все виды эксплуатационного нагружения, обусловливающие эволюцию структурного состояния материала.

В качестве исходного рассматривается структурное состояние материала заготовки до выполнения первой операции обработки (СС 0). Результатом действия контекстной функции является формирование некоторого конечного структурного состояния металла (СС конечное). В качестве управляющего воздействия трансформации структурного состояния из исходного в конечное рассматриваются свойства материала.

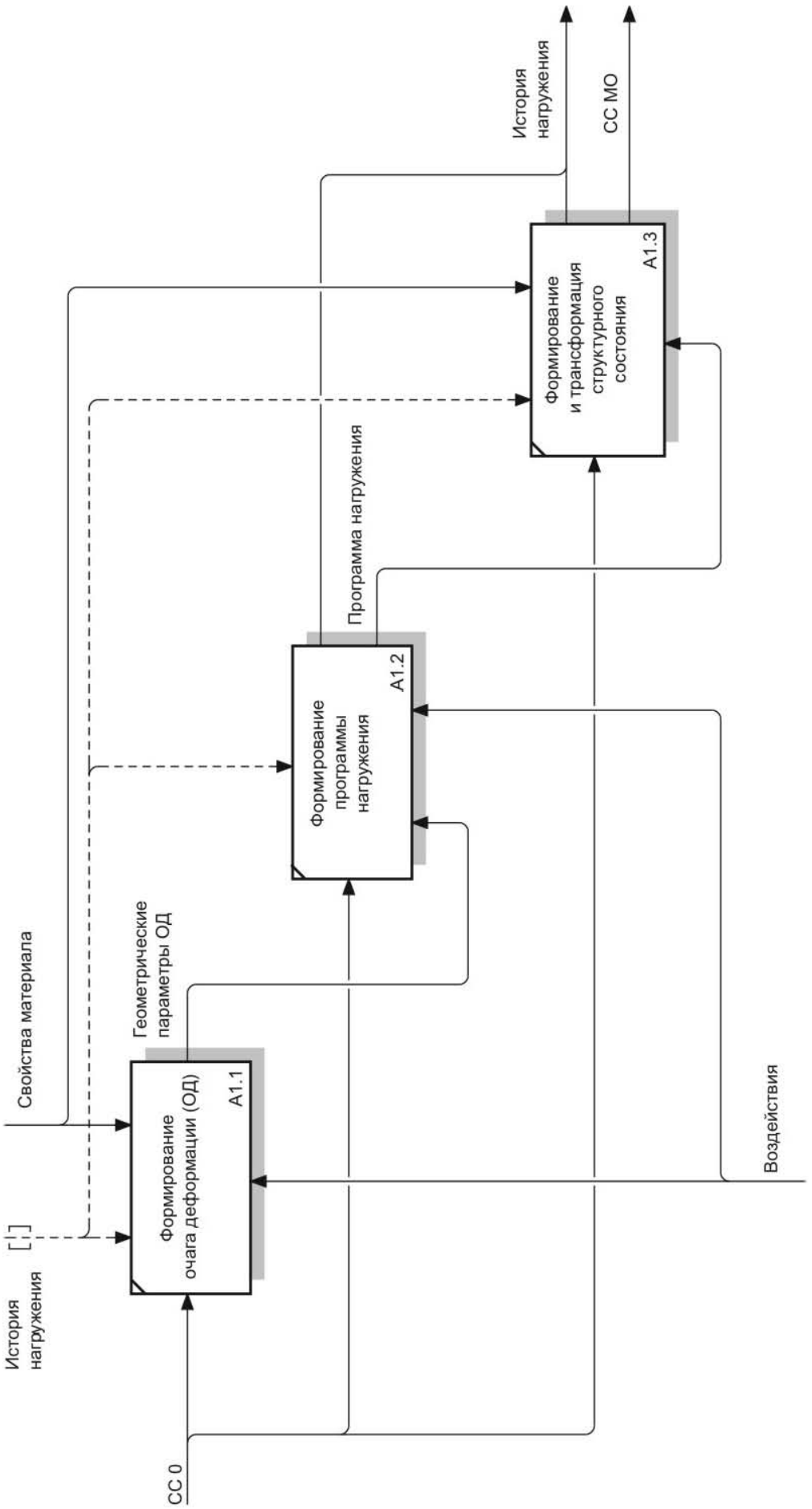


Рис. 7. Декомпозиция функции A1 – формирование структурного состояния на стадиях механической обработки

Механизмом этой трансформации являются технологические и эксплуатационные воздействия.

При декомпозиции контекстной функции стадии механической обработки и эксплуатации были выделены в отдельные подфункции (А1 и А2 на рис. 6).

В соответствии с моделью в результате механической обработки формируется структурное состояние металла (СС МО), которое является исходным для стадии эксплуатации изделия. В качестве управляющих воздействий формирования структурного состояния используются свойства материала, а на стадии эксплуатации – еще и история нагружения материала на стадиях механической обработки.

Формирование структурного состояния на стадиях механической обработки происходит в условиях пластического течения в очаге деформации.

Соответственно декомпозиция функции А1 (рис. 7) предполагает описание формирования очага деформации под действием режимов обработки (А1.1), формирования программы нагружения (А1.2), и, наконец, формирования структурного состояния как результата действия программы нагружения (А1.3).

Следует отметить, что если при обработке изделия реализуется несколько стадий нагружения, то функции А1.1-А1.3 осуществляются в условиях действия истории нагружения на всех предшествующих стадиях в качестве дополнительного управляющего воздействия.

Таким образом, в соответствии с описанной моделью, ключевым механизмом формирования структурного состояния на стадиях механической обработки является программа нагружения.

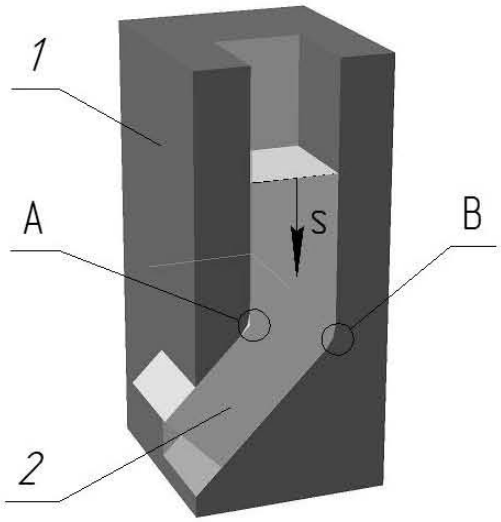


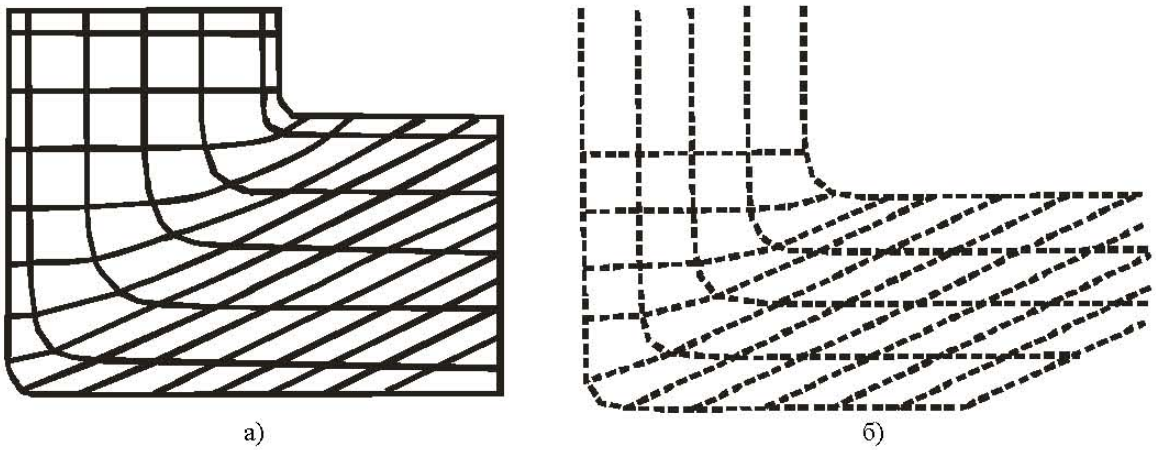
Рис. 8. Общий вид модели. 1 – матрица, 2 – деформируемый образец, А – зона внутреннего угла матрицы, В – зона наружного угла матрицы. S – направление перемещения заготовки.

Для определения вида программы нагружения выполнено, конечно-элементное моделирование равноканального углового прессования с различными углами пересечения каналов матрицы и радиусами скругления в наружном и внутреннем углу матрицы (рис. 8.).

По полученным результатам моделирования определены координаты точек линий тока, компоненты НДС.

В работе [9] произведено исследование пластического течения металла при РКУП экспериментальными методами и компьютерным моделированием.

В результате проведенного анализа установлено, что образец при прохождении через очаг деформации подвергается не только простому



а) б)

Рис. 9. Исследование пластического течения экспериментальным методом[9] и моделированием а) форма штифтов в продольном сечении заготовки меди после одного цикла РКУП; б) форма сетки при численном моделировании способа РКУП.

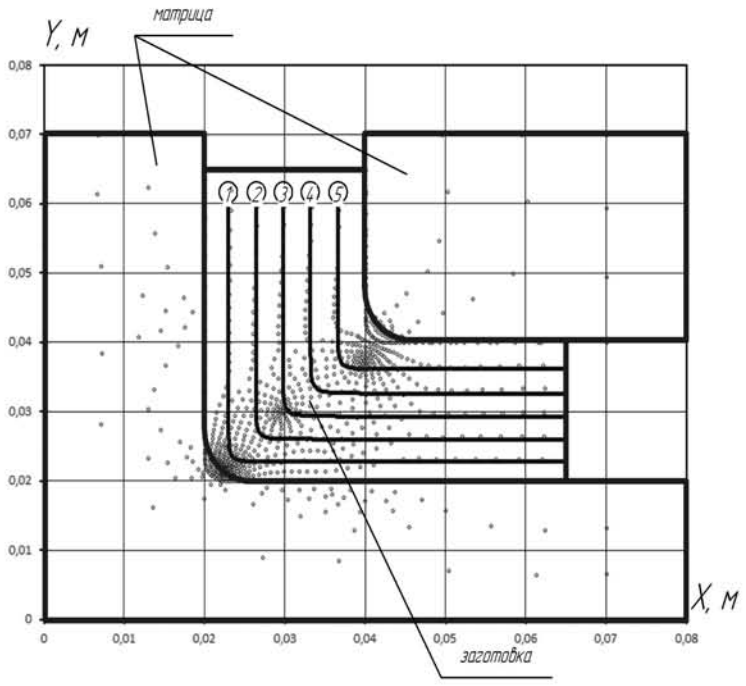


Рис. 10. Узлы конечно-элементной модели и линии тока. Цифрами обозначены линии тока по которым производился расчёт.

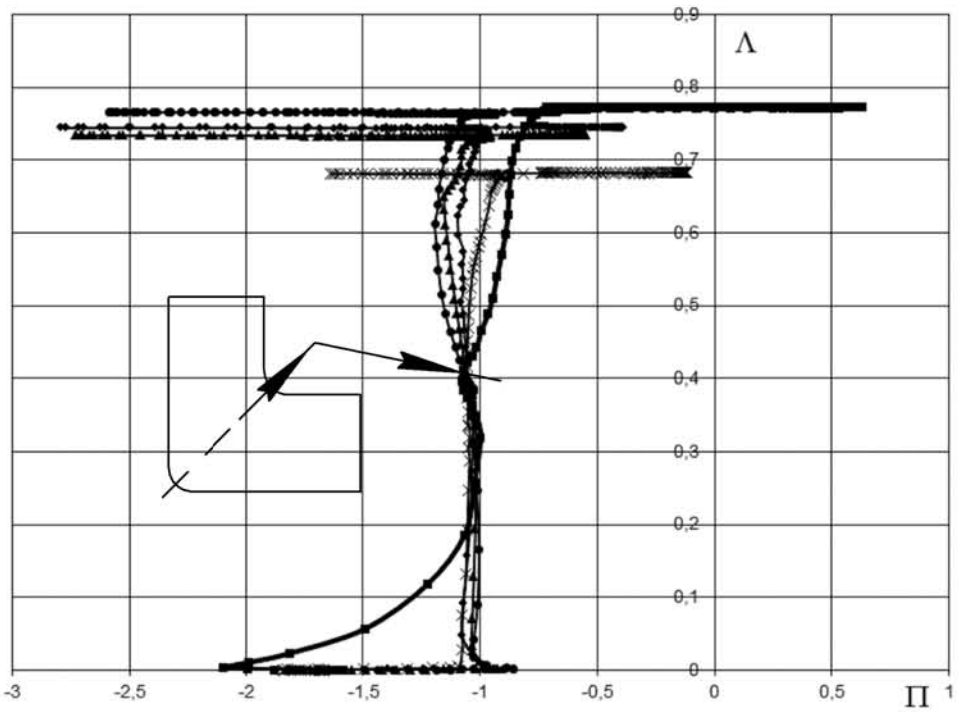


Рис. 11. Программы нагружения, формирующиеся вдоль линий тока.

сдвигу, но и последовательному сжатию и растяжению, о чем свидетельствует соответствующее изменение геометрии ячеек в продольной плоскости образца в очаге и характер накапливаемой деформации (рис. 9). Сравнение результатов экспериментальных и теоретических исследований изменение геометрии ячеек показало отклонение в 3% теоретического расчёта проведённого по модели и практического результата.

Вдоль линий тока произведён расчёт накопленной степени деформации сдвига и показателя напряжённого состояния.

Как видно из рис. 11. программа нагружения имеет вертикальный участок, т.е. накопление деформации сдвига происходит при практически неизменном показателе напряженного состояния

Π, на данном участке накапливается до 85% (для моделей с различными параметрами эта значение несколько изменяется) всей деформации. В дальнейшем происходит изменение Π без накопления деформаций.

Описанный выше вид программы нагружения характерен для всех моделей. Данная закономерность позволяет предположить, что наличие вертикального участка в программе нагружения является одним из важных условий деформационного наноструктурирования.

На данный момент получено распределение параметров механического состояния металла вдоль линий тока при равноканальном угловом прессовании.

Установлено, что деформационное наноструктурирование происходит при накоплении деформации в условиях постоянного показателя напряженного состояния. При этом значение Π отрицательно, что свидетельствует о реализации схемы сжатия в процессе обработки.

Ведётся разработка способа деформационного наноструктурирования на основе интенсивной пластической деформации, который позволит реализовать программу нагружения, имеющую вертикальный участок.

В настоящее время разработана модель технологической установки.

Планируется проведение теоретических и экспериментальных исследований влияния режимов деформационного наноструктурирования на эксплуатационные свойства.

ВЫВОДЫ

1. Проведен обзор основных способов деформационного наноструктурирования и выявлено отсутствие достаточно общих моделей позволяющих оценивать структурное состояние металла после его обработки.

2. Выбрано направление дальнейших исследований: описания процессов трансформации металла при деформационном наноструктурировании с точки зрения механики технологического наследования.

3. Разработана функциональная модель формирования параметров наностуктурного состояния с точки зрения механики технологического наследования. Описывающая основные представления о процессах формирования и трансформации наноструктурного состояния.

4. Произведено моделирование процессов обработки равноканальным угловым прессованием с варьируемыми параметрами обработки, получены распределения напряжённо-деформированного состояния, определён вид программы нагружения и произведено сравнение с результатами экспериментальных исследований других авторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новые материалы. Коллектив авторов. Под научной ред. Ю.С.Карабасова. - М: МИСИС. - 2002 - 736 с.

2. *Мулюков Р.Р.* //Российские нанотехнологии. -2007. -Т. 2.- № 7-8. - С. 38-53.

3. *Nazarov A.A. and Mulyukov R.R.* //Nanoscience, Engineering and Technology Handbook / Eds. S. Lyshevski, D. Brenner, J. Iafrate, W. Goddard. - Boca Raton: CRC Press, 2002. - P. 22-1-22-41. 11.-P. 188-193.

4. *Корзников А.В., Идрисова СР., Димитров О. и др.* //ФММ. - 1998. - Т. 85. - № 5.-С. 91-95.

5. *Degtyarov M.V., Chashchukhina T.I., Voronova L.M., et al.* // Acta Mater. - 2007. -V. 55.-P. 6039-6050.

6. *Мулюков Р.Р., Назаров А.А., Имаев Р.М.* Деформационные методы наноструктурирования материалов: предпосылки, история, настоящее и перспективы. Известия высших учебных заведений Физика 2008 №5

7. *Гусев А. И.* Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства. Екатеринбург: УрО РАН, 1998.

8. *Блюменштейн В.Ю., Смелянский В. М.* Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 400 с.

9. *Рааб Г. И.* Развитие научных основ технологий интенсивной пластической деформации и создание оборудования по схеме равноканального углового прессования для получения получения ультрамелкозернистых металлических полуфабрикатов. автореф. докт. диссерт. – Уфа, 2009

□ Автор статьи:

Пимонов
Максим Владимирович, старший преподаватель, каф. технологии машиностроения КузГТУ.
Email: makc130685@gmail.com