

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВРЕЖДЕННОСТИ
МЕТАЛЛА В ПРОЦЕССЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ
ДЕФОРМАЦИИ ДЛИННОМЕРНОЙ ЗАГОТОВКИ
РАВНОКАНАЛЬНЫМ УГЛОВЫМ ПРЕССОВАНИЕМ
ПО СХЕМЕ КОНФОРМ**

А.В. Боткин*, Р.З. Валиев, А.А. Кубликова, Е.В. Вареник

Уфимский государственный авиационный технический университет, К. Маркса 12, Уфа, 450000, Россия

Лаборатория механики новых наноматериалов, Санкт-Петербургский политехнический университет

Петра Великого, Санкт-Петербург, 195251, Россия

*e-mail: botkinav@yandex.ru

Аннотация. Разработан алгоритм применения результатов компьютерного моделирования течения металлической заготовки и математической модели Кокрофта–Лэтэма поврежденности материала для определения рациональных термических и механических условий деформации длинномерной заготовки равноканальным угловым прессованием по схеме Конформ. Представлено хорошее согласование результатов прогнозирования разрушения металла и данных физического эксперимента.

1. Введение

Последние два десятилетия характеризуются активным развитием теории и технологии процессов интенсивной пластической деформации (ИПД), направленных на измельчение зерен в различных металлических материалах вплоть до десятков - сотен нанометров и формирования в них объемных наноструктурных состояний с привлекательными свойствами в получаемых полуфабрикатах и изделиях [1-3].

Процессы ИПД для формирования ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры осуществляют при температурах ниже температуры рекристаллизации металла [4-7]. В этих процессах преимущественно реализуется деформация заготовки сдвигом, когда она проходит через зону сопряжения каналов равного сечения, выполненных в специальной оснастке. Такая форма инструмента позволяет многократно деформировать заготовку и достигать сверхвысоких значений деформации ($\varepsilon_i \geq 4-6$), что является необходимым условием при формировании УМЗ структуры материала.

Весьма актуальным вопросом при разработке процессов ИПД полуфабрикатов и последующего пластического формоизменения наноструктурных заготовок в операциях обработки металлов давлением (ОМД) является моделирование поврежденности металла. Решение этого вопроса важно, поскольку накапливаемые в ходе ИПД деформации велики. При этом материал заготовки, исчерпав свою способность к деформированию, начинает разрушаться после, например, определенного числа проходов равноканального углового прессования [8-9] или при выполнении последующей операции ОМД.

Математическое моделирование поврежденности металла при большой пластической деформации актуально для понимания сути процессов, происходящих при обработке металлов давлением. Результаты математического моделирования формоизменения заготовки при ИПД позволяют обоснованно подходить к выбору рациональных способов и режимов (температура обработки, скорость прессования, угол пересечения каналов, угол сужения выходного канала, длина выходного канала и др. параметров обработки, влияющих на механические условия деформации металла).

Предельные деформации в процессах ИПД ограничиваются вязким разрушением металла. Вязкое разрушение металла сопровождается развитием и увеличением количества микропор и микротрещин, относительный объем которых в единице объема металла характеризуется расчетным параметром – поврежденностью металла.

Физические представления о разрушении некоторых деформируемых УМЗ металлов представлены в статье [10].

В отечественной и зарубежной литературе к настоящему времени опубликовано достаточно много моделей, с помощью которых можно оценивать поврежденность (повреждаемость или использованный ресурс пластичности) металла [11–15].

В практике расчетов в нашей стране наибольшее распространение получили модели поврежденности металла – В. Л. Колмогорова [11], А. А. Богатова [16], за рубежом – Кокрофта-Лэтэма [15,17–21], которая установлена в программном комплексе DEFORM 3D по умолчанию, как основная математическая модель прогнозирования разрушения металла при большой пластической деформации.

Поврежденность металла не должна превышать некоторого критического значения, так как при его превышении происходит потеря прочностных характеристик изделия [16].

При достижении значения поврежденности, равного единице, появляется макроскопическая трещина.

В работе [22] предложена модифицированная математическая модель разрушения металла Кокрофта–Лэтэма [17], позволяющая учитывать при расчете поврежденности металла изменяющееся напряженное состояние материальной точки заготовки.

До настоящего времени одним из основных методов ИПД, позволяющих получать заготовки в виде прутков с УМЗ структурой из конструкционных материалов, в том числе и сталей, является равноканальное угловое прессование (РКУП) [23-25]. Этот метод применяют с целью подготовки структуры, преимущественно, в металлических прутках с круглым и квадратным поперечным сечением. В процессе РКУП заготовка неоднократно продавливается в специальной оснастке через два канала с одинаковыми поперечными сечениями, пересекающихся обычно под углом 90°. При необходимости в случае труднодеформируемых материалов деформация осуществляется при повышенных температурах.

Метод равноканального углового прессования по схеме Конформ (РКУП-К) (Рис. 1) реализует принцип воздействия активных сил трения на боковую поверхность заготовки и используется для высокопроизводительного получения длинномерных УМЗ металлических полуфабрикатов с последующим изготовлением из них различных изделий [5]. В отличие от других способов непрерывного прессования, основанных на использовании активных сил трения, способ РКУП-К имеет наиболее простую кинематическую схему, достаточно высокую технологическую гибкость за счет быстрой смены инструмента, обеспечивает более высокие скорости прессования. Непрерывное прессование на установке Конформ обеспечивает высокое качество и точность геометрических размеров готовых изделий, практически полное использование материала заготовки благодаря отсутствию пресс-остатка.

Многие научные группы для исследования процессов РКУП активно используют

компьютерное моделирование с использованием современных коммерческих программных комплексов, которые основаны на методе конечных элементов (МКЭ): ABAQUS, MSC/MARC, LS-DYNA, DEFORM 3D, QFORM. Опубликовано достаточно много статей об использовании МКЭ при моделировании РКУП [26-30], основная цель которых является исследование напряженного состояния.

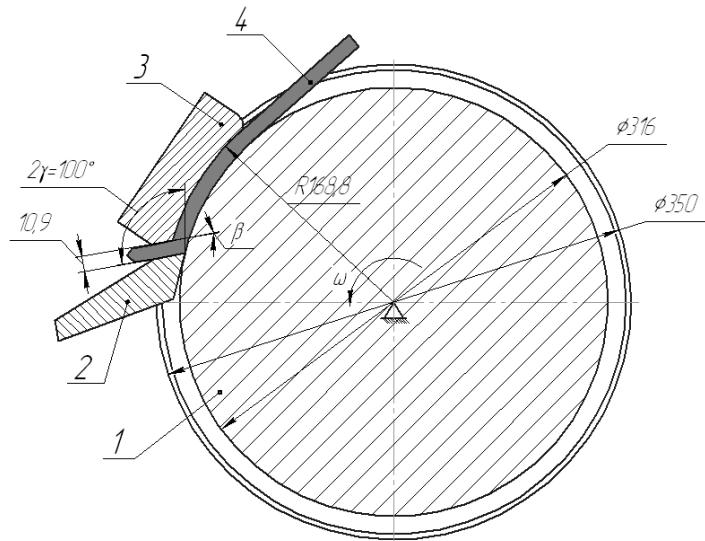


Рис. 1. Схема инструмента РКУП-К для прессования заготовок прямоугольного сечения (1 – ротор; 2 – упор; 3 – прижим; 4 – заготовка).

Вопросы по разрушению металла в процессе РКУП рассматривались в некоторых работах, например, в работе [8]. Авторы этой работы исследовали процесс РКУП как метод получения УМЗ материалов на примере магниевого сплава. Разрушение металла при РКУП анализировали с помощью экспериментального и численного методов. Авторы [8] применяли две модели поврежденности металла для прогнозирования разрушения при РКУП, а именно модель поврежденности Кокрофта-Лэтэма и модель Р. Лаповок [31].

Исследования поврежденности металла в работе [8] были выполнены для однопроходного процесса РКУП. Вопрос методического обеспечения прогнозирования разрушения металла при многопроходном РКУП заготовки не рассматривался.

В настоящей работе показана применимость математической модели поврежденности металла [22] для определения благоприятных термических и механических условий деформации металла при получении длинномерных УМЗ заготовок в многопроходном процессе РКУП-К.

2. Материал и методики исследования

В качестве объекта исследований использовали заготовку прямоугольного сечения 11,2 × 10,7 мм² и длиной 80 мм, из титанового сплава ВТ-6.

В процессе исследований выполняли компьютерное моделирование процесса РКУП-К заготовки с использованием программного комплекса *DEFORM 3D* [32] и физический эксперимент.

При проведении компьютерного моделирования РКУП-К были приняты следующие условия и допущения:

- заготовка – пластичное тело;

- кривые упрочнения сплава при 200 °C, 300 °C, 400 °C, полученные экспериментально, при скорости деформации, соответствующей РКУП-К, вводили при подготовке базы данных в виде табличной функции;

- инструмент (Рис. 1) – абсолютно жесткое тело (3D модели инструмента были предварительно созданы в «КОМПАС 3D V13»);
- скорость прессования – 28 мм/с; угловая скорость вращения ротора – 0,177 рад/с;
- решали изотермическую задачу; температура заготовки и инструмента – постоянная, равная начальной температуре заготовки; тепловым эффектом деформации из-за малой скорости деформации пренебрегали;
- трение учитывали по «закону» Зибеля $\tau_k = \mu \times \tau_s$, где τ_s – напряжение течения при сдвиге, коэффициент трения принимали $f = 0,5$;
- количество конечных элементов – 75000;
- количество шагов моделирования – 4500.

Поврежденность рассчитывали по формуле, полученной в работе [22]:

$$\omega = \sum_{k=1}^r \left[\Delta c_k / \left[\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_i} \right)_{cp} \varepsilon_{i,p} \right]_k \right], \quad (1)$$

где r – количество этапов деформирования материальной точки, $\Delta c_k = \int_{\varepsilon_{i,k}}^{\varepsilon_{i,k+1}} \frac{\sigma_1}{\sigma_i} d\varepsilon_i$ –

приращение показателя Кокрофта-Лэтэма на k -ом этапе деформирования материальной точки заготовки, $\varepsilon_{i,k}$ – степень деформации, накопленной материальной точкой заготовки к началу k -го этапа деформирования, $\varepsilon_{i,k+1}$ – степень деформации, накопленной материальной точкой заготовки к окончанию k -го этапа деформирования, σ_1 – главное положительное нормальное напряжение, σ_i – интенсивность напряжений, $(\sigma_1 / \sigma_i)_{cp}$ – среднее значение отношения главного положительного нормального напряжения к интенсивности напряжений на k -ом этапе деформирования материальной точки заготовки, $\varepsilon_{i,p}$ – интенсивность деформации, накопленной материальной точкой образца при испытании к моменту разрушения при постоянном значении показателя σ_1 / σ_i напряженного состояния.

Функции

$$\varepsilon_{i,p} = -1,397 \ln\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_i}\right) + 0,5, \quad \varepsilon_{i,p} = -1,397 \ln\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_i}\right) + 0,57, \quad \varepsilon_{i,p} = -1,397 \ln\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_i}\right) + 0,817,$$

определяющие пластичность сплава ВТ-6 при температурах 200 °C, 300 °C и 400 °C соответственно, устанавливали экспериментально по методике, приведенной в работе [22].

Траекторию материальной точки, в которой рассчитывали поврежденность, представляли r этапами деформирования с длительностью t_3 каждого этапа деформирования равной t_3 . Количество r этапов деформирования принимали таким, чтобы выполнялось условие [22]:

$$0,99 \leq \sum_{k=1}^r \left[\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_i} \right)_{cp} t_3 \right]_k / S \leq 1, \quad (2)$$

где S – площадь плоской фигуры, ограниченной графической зависимостью показателя напряженного состояния σ_1 / σ_i материальной точки заготовки от времени оси абсцисс, ординат и линией, параллельной оси ординат, проходящей через точку $(t_0 ; 0)$,

t_d – время деформирования материальной точки.

Выбор коэффициента трения для моделирования процесса РКУП-К производили на основе методики, описанной в работе Д. Ф. Пузырькова и др. [33] и базирующейся на измерении силы при прямом выдавливании.

Методика реализуется следующим образом.

Деформация при прямом выдавливании образца равна деформации, получаемой заготовкой за один цикл обработки РКУП-К. Скорость деформирования при прямом выдавливании выбирается таким образом, чтобы средняя скорость скольжения металла относительно поверхности деформирующего участка матрицы для прямого выдавливания была равна скорости деформирования при РКУП-К.

Экспериментально деформируют образцы с использованием различных смазок и измеряют при этом максимальное значение силы деформирования. При этом образцы для прямого выдавливания изготавливают из металла, подвергаемого РКУП-К. Матрицу для прямого выдавливания изготавливают из материала инструмента для РКУП-К. Качество обработки поверхностей матриц для прямого выдавливания и для РКУП-К должно быть одинаковым.

Метод РКУП-К реализует принцип воздействия активных сил трения на боковую поверхность заготовки. Поэтому для процесса РКУП-К необходима смазка, обеспечивающая максимальное значение силы деформирования и беззадирное деформирование образца.

Поверхность образца покрывали смазкой «Росоил–Conform», специально разработанной для этого процесса. Смазка представляет собой самовысыхающую композицию изопропилового спирта, графита и полимеров.

Трибологические свойства смазки изменяли содержанием графита (20, 30, 40, 50 %). Графические зависимости силы прямого выдавливания от времени при различном содержании графита в смазке представлены на Рисунке 2.

Значения коэффициентов трения в зависимости от содержания графита в смазке «Росоил–Conform» представлены в таблице 1.

Таблица 1. Значения коэффициентов трения.

Содержание графита в смазке, %	Степень деформации, ϵ , %		
	30	40	50
10	0,308	0,173	-
25	0,280	0,143	-
40	0,247	0,192	0,470

Оценка коэффициента трения показала значения, близкие к 0,5 при содержании графита 40 % (Таблица 1). Поэтому при моделировании процесса РКУП-К в программном комплексе Deform 3D использовали коэффициент трения, равный 0,5.

3. Результаты моделирования, расчета поврежденности металла и эксперимента

Максимальное значение показателя Кокрофта–Лэтэма $c = \int_0^{\epsilon_i} \frac{\sigma_i}{\sigma_i} d\epsilon_i$ – показателя поврежденности металла, наблюдается в области заготовки, примыкающей при РКУП-К к внутреннему углу матрицы (Рис. 3а).

Поэтому расчет поврежденности металла выполняли для материальной точки, выбранной именно из этой области заготовки (Рис. 3а).

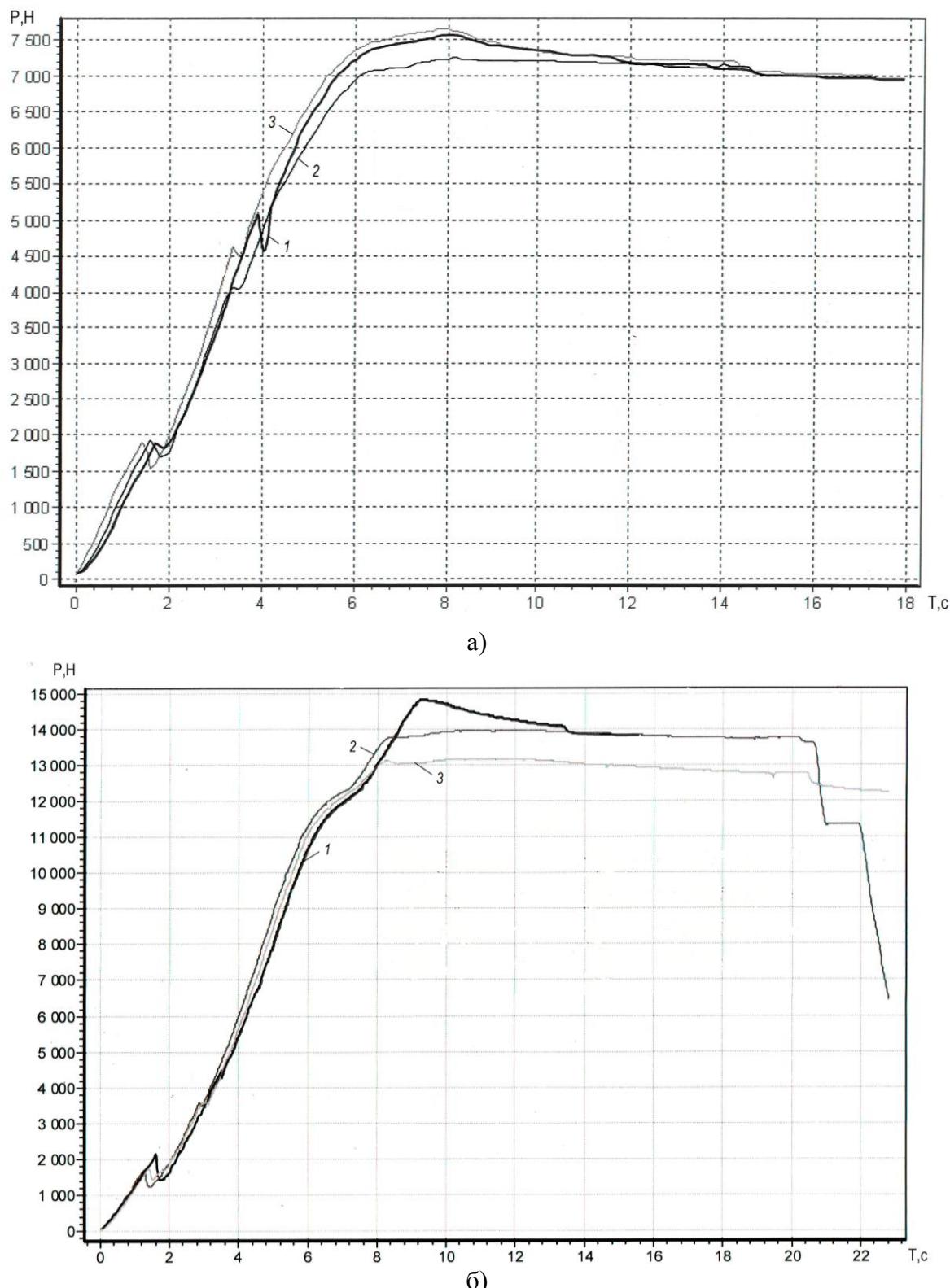


Рис. 2. Графические зависимости силы прямого выдавливания от времени,
а) при 20 % содержании графита в смазке; б) при 40 % содержании графита в смазке;
типы смазки: 1 – «Росоил–Conform», 2 – «Росоил 2», 3 – «Росоил 3».

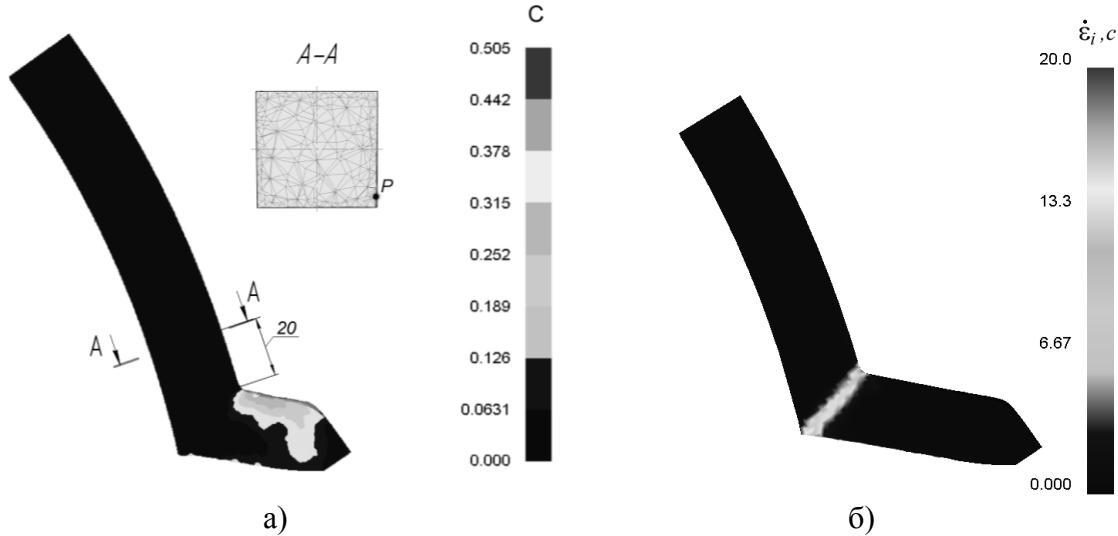


Рис. 3. Схема положения материальной точки и распределение показателя поврежденности металла и интенсивности скорости деформации в заготовке:
а – распределение показателя Кокрофта–Лэтэма c в продольном сечении деформированной заготовки, начальное положение материальной точки;
б – распределение интенсивности скорости деформации в продольном сечении заготовки.

Из Рисунка 3б видно, что очаг пластической деформации сосредоточен в узкой области, расположенной вблизи плоскости, проходящей через биссектрису угла пересечения осей симметрии каналов, ширина которой составляет примерно 3 мм.

Когда рассматриваемая материальная точка находится в очаге пластической деформации, при каждом из четырех проходов она испытывает действие как сжимающих, так и растягивающих напряжений. Причем большую часть времени указанная точка находится под действием сжимающих напряжений. Положительные нормальные напряжения по модулю примерно в 1,5 раза меньше сжимающих.

Для всех проходов рассматриваемая материальная точка пребывает сначала под действием сжимающих напряжений и только на выходе из очага пластической деформации точка испытывает действие нормальных положительных напряжений σ_1 . В эти промежутки времени: 0,15-0,23 с (для 1-го прохода); 0,23-0,27 и 0,63-0,67 с (для 2-го прохода); 0,67-0,69 и 1,13-1,23 с (для 3-го прохода); 1,23-1,3 и 1,55-1,65 с (для 4-го прохода) – интенсивно прирастает показатель поврежденности c (Рис. 4, Рис. 5).

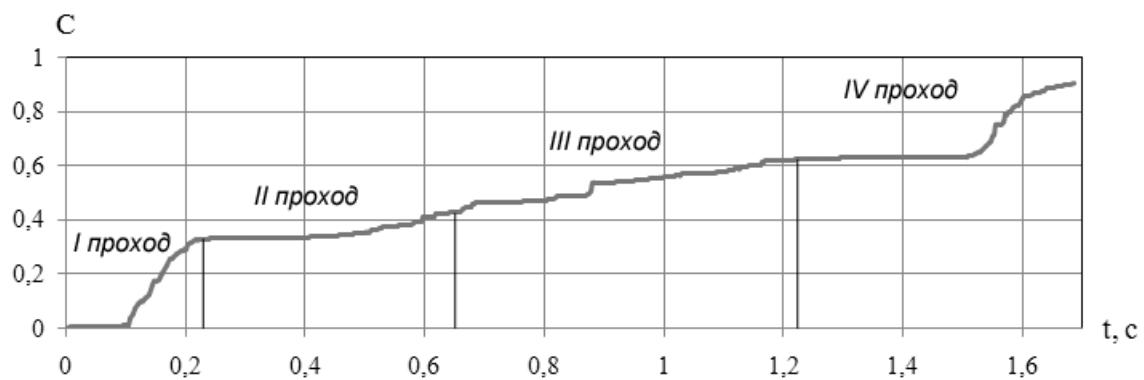


Рис. 4. Графическая зависимость показателя поврежденности C материальной точки от времени.

Показатель поврежденности c указанной материальной точки заготовки не изменяется, когда точка находится в сужающемся выходном канале матрицы (Рис. 1), интенсивно увеличивается на 1-ом и 4-ом проходах РКУП-К, когда точка находится в зоне сдвига очага деформации (Рис. 3). Интенсивному увеличению показателя поврежденности c в каждом проходе способствует действие положительного нормального напряжения σ_1 (Рис. 4 и Рис. 5).

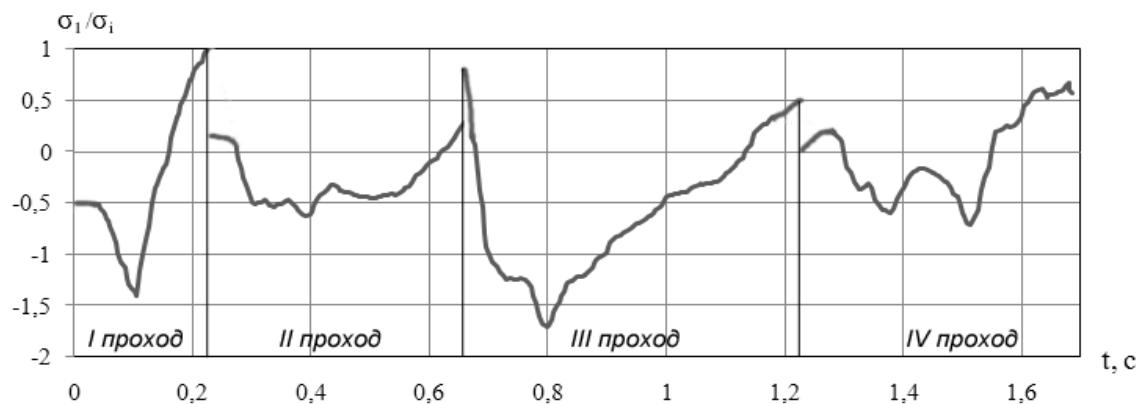


Рис. 5. Графическая зависимость показателя напряженного состояния σ_1 / σ_i материальной точки от времени.

При расчете поврежденности металла, за четыре прохода, время прохождения материальной точки заготовки через очаг деформации представляли 110-ю этапами деформирования с длительностью этапа t_s , равной 0,006 с. Указанные параметры этапного представления деформирования материальной точки заготовки соответствуют выполнению условия (2). Значения поврежденности металла, рассчитанные по формуле (1) для первого прохода при температурах 200 °C, 300 °C и 400 °C, получили равными 0,331, 0,310 и 0,257 соответственно.

Таблица 2. Значения поврежденности металла за четыре прохода при разных температурах обработки.

Температура обработки, °C	Число проходов РКУП-К			
	1	2	3	4
200	0,331	0,419	0,516	0,974
300	0,310	0,397	0,491	0,934
400	0,257	0,340	0,426	0,826

После четырех проходов РКУП-К, с поворотом заготовки на 90° вокруг «продольной» оси перед очередным проходом РКУП-К, расчетные значения поврежденности металла в указанной материальной точке заготовки при температурах 200 °C, 300 °C и 400 °C составили 0,974, 0,934 и 0,826 соответственно. Таким образом, можно сделать три прохода без опасения снижения прочностных характеристик [16], тогда как в четвертом проходе РКУП-К существует вероятность разрушения материала т. к. значение поврежденности близко к единице и при T=200 °C поврежденность максимальна и равна 0,974 (Таблица 2).

Деформирование заготовок проводили в установке, приведенной на Рисунке 6 (<http://www.nanospd.ru>). Перед каждым проходом заготовка покрывалась специально разработанной для данного процесса смазкой «Росойл-Conform», обеспечивающей хорошее сцепление с инструментом. Перед каждым деформированием, заготовки нагревали в течение 20 минут в печи электросопротивления.

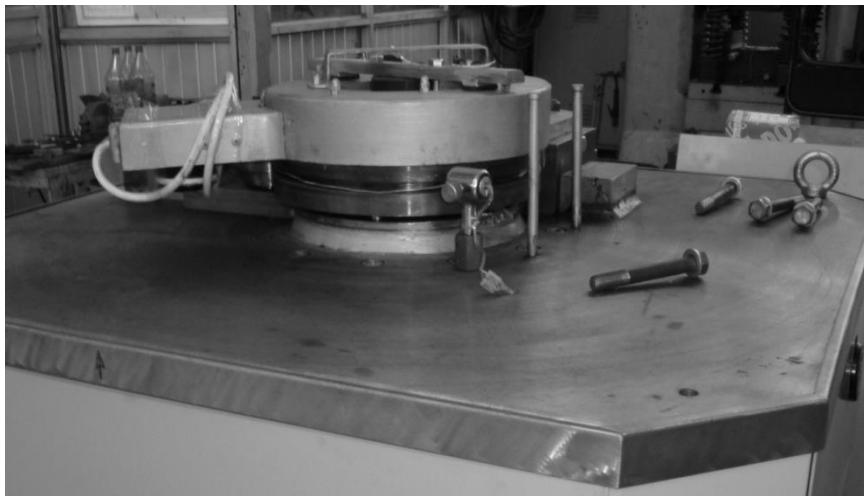


Рис. 6. Общий вид установки РКУП-К, изготовленной в ИФПМ УГАТУ.

Инструмент РКУП-К предварительно нагревали до соответствующей температуры с использованием встроенного нагревателя. При каждой температуре деформировали по пять заготовок. Физический эксперимент показал, что разрушение заготовок при температуре 200 °С происходит во время осуществления четвертого прохода РКУП-К (Рис. 7). Анализ разрушения образцов, при температуре 200 °С, показал, что разрушение начинается с поверхностных слоев заготовки в местах действия максимальных значений растягивающих напряжений.



Рис. 7. Заготовки, полученные после четырех проходов РКУП-К.

Образцы, деформированные при $T=300$ °С и 400 °С не разрушились.

4. Выводы

1. Использование результатов компьютерного моделирования пластического течения металлической заготовки и модифицированной математической модели Кокрофта-Лэтэма поврежденности материала позволяет определить рациональные режимы РКУП-К длинномерной заготовки, в частности благоприятную температуру обработки и число проходов.

2. Результаты расчета поврежденности металла при РКУП-К хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными при обработке заготовок из сплава Ti Grade 4 (ВТ6), что подтверждает применимость модифицированной математической модели Кокрофта-Лэтэма при разработке рациональной технологии РКУП-К.

Данная работа выполнена при поддержке (для РЗВ и ЕВВ, выполнявших экспериментальные исследования) Российского научного фонда (проект 14-29-00199) и Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого в рамках Программы <5-100-2020>, а также (для АВБ и ААК - проведение компьютерного моделирования) при поддержке Российского научного фонда (проект 15-19-00144).

Литература

- [1] R.Z. Valiev, R.K. Islamgaliev, I.V. Alexandrov // *Progress in Materials Science* **45** (2000) 103.
- [2] Я.Е. Бейгельзимер, В.Н. Варюхин, Д.В. Орлов, С.Г. Сынков, *Винтовая экструзия – процесс накопления деформации* (Фирма ТЕАН, Донецк, 2003).
- [3] Р.З. Валиев, И.В. Александров, *Объемныеnanoструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства* (ИКЦ «Академкнига», Москва, 2007).
- [4] Г.И. Рааб // *Физика и техника высоких давлений* **15(1)** (2004) 72.
- [5] Г.И. Рааб, Ф.Ф. Сафин, Р.З. Валиев // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением* **6** (2006) 41.
- [6] А.В. Боткин, Г.И. Рааб, А.Н. Абрамов, Р.З. Валиев // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением* **6** (2009) 3.
- [7] А.В. Боткин, Р.З. Валиев, А.Н. Абрамов, А.Г. Рааб // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением* **11** (2009) 8.
- [8] S.C. Yoon, C.H. Bok, M.H. Seo, T.S. Kim, H.S. Kim // *Materials Transactions* **49(5)** (2008) 963.
- [9] P.R. Cetlin, M.T.P. Aguilar, R.B. Figueiredo, T.G. Langton // *Journal of Materials Science* **45** (2010) 4561.
- [10] И.А. Овидько, А.Г. Шнейнерман // *Физика и механика материалов* **21** (2014) 248.
- [11] В.Л. Колмогоров, *Механика обработки металлов давлением* (Издательство УПИ, Екатеринбург, 2001).
- [12] Б.И. Береснев, Е.Д. Мартынов, К.П. Родионов, Д.К. Булычев, Ю.Н. Рябинин, *Пластичность и прочность твердых тел при высоких давлениях* (Наука, Москва, 1970).
- [13] N.V. Biba, S.A. Stebunov, S.V. Smirnov, In: *Simulation of Materials Processing. Theory, Methods and Applications*, ed. by Kenichiro Mori (Swets and Zeitinger, Lisse, Netherlands, 2001), p. 351.
- [14] В.А. Огородников, *Оценка деформируемости металлов при обработке давлением* (Выща школа, Киев, 1983).
- [15] M.G. Cockcroft, D.J. Latham // *Journal of the Institute of Metals* **96** (1968) 33.
- [16] А.А. Богатов, *Механические свойства и модели разрушения металлов* (ГОУВПО УГТУ – УПИ, Екатеринбург, 2002).
- [17] S.I. Oh, C.C. Chen, S. Kobayashi // *Journal of Engineering for Industry-Transactions of the ASME* **101** (1979) 36.
- [18] R. Hambli, M. Reszka // *International Journal of Mechanical Sciences* **44** (2002) 1349.
- [19] N. Ogawa, M. Shiomi, K. Osakada // *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **42** (2002) 607.
- [20] H. Kim, M. Yamanaka, T. Altan, In: *Proceedings of NAMRC* (Society of Manufacturing Engineers, Houghton, Michigan, USA, 1995), p.63.
- [21] S. Alexandrov, D. Vilotic // *Journal of Mechanical Engineering Science* **222** (2008) 1869.
- [22] А.В. Боткин, Р.З. Валиев, П.С. Степин, А.Х. Баймухаметов // *Деформация и разрушение материалов* **7** (2011) 17.
- [23] R.Z. Valiev, N.K. Trenev, In: *Hot Deformation of Aluminum Alloys*, eds. T.G. Langton,

- H.D. Merchant, J.G. Morris, M.A. Zaidi (TMS, Warrendale, PA, USA, 1991) 319.
- [24] R.Z. Valiev, N.A. Krasilnikov, N.K. Trenev // *Materials Science and Engineering A* **317** (1991) 35.
- [25] R.Z. Valiev, F. Chmelik, F. Bordeaux, G. Kapelski, B. Baudelet // *Scripta Metallurgica et Materialia* **27** (1992) 855.
- [26] H.S. Kim, M.H. Seo, S.I. Hong // *Materials Science and Engineering A* **291** (2000) 86.
- [27] H.S. Kim, S.I. Hong, M.H. Seo // *Journal of Materials Research* **16** (2001) 856.
- [28] S.J. Oh, S.B. Kang // *Materials Science and Engineering A* **343** (2003) 107.
- [29] V.M. Segal // *Materials Science and Engineering A* **386** (2004) 269.
- [30] H.S. Kim, Y. Estrin // *Materials Science and Engineering A* **410–411** (2005) 285.
- [31] R.Y. Lapovok // *Journal of Materials Science* **40** (2005) 341.
- [32] Лицензия. Р. С. SFTS. Key#9190/ Ufa, Russia.
- [33] Пузырьков Д.Ф., Шолом В.Ю., Тюленев Д.Г., Абрамов А.Н. // *Кузнеично-штамповочное производство. Обработка материалов давлением* **5** (1999) 22.

COMPUTER MODELING OF METAL DAMAGE DURING SEVERE PLASTIC DEFORMATION OF LONG-LENGTH TITANIUM BILLETS BY EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING «CONFORM»

A.V. Botkin*, R.Z. Valiev, A.A. Kublikova, E.V. Varenik

Ufa State Aviation Technical University, K. Marx St. 12, Ufa, 450000, Russia

Research Laboratory for Mechanics of New Nanomaterials,

Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, 195251, Russia

*e-mail: botkinav@yandex.ru

Abstract. The modified model of metal damage by Cockcroft & Latham that considers its stress-strain state is described. The above mentioned model is employed to predict failure of pure titanium and determine rational thermal and mechanical conditions of deformation during equal channel angular pressing «Conform». A good correlation between theoretical prediction by the modified model and experimental results is demonstrated.

Acknowledgements

This work was supported (for RZV and EVV who performed experimental research) by the Russian Science Foundation (Project 14-29-00199) and Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University in the framework of the Program "5-100-2020" as well as (for AVB and AAK who performed computer modeling) by the Russian Science Foundation (Project 15-19-00144).

References

- [1] R.Z. Valiev, R.K. Islamgaliev, I.V. Alexandrov // *Progress in Materials Science* **45** (2000) 103.
- [2] Ya.E Beygel'zimer, V.N. Varyukhin, D.V. Orlov, S.G. Synkov, *Screw extrusion as a process of accumulation of deformation* (TEAN Publ., Donetsk, 2003). (In Russian).
- [3] R.Z. Valiev, I.V. Alexandrov, *Obyomnie nanostrukturiye metallicheskie materialy: polucheniye, struktura i svoistva* (Academkniga, Moscow, 2007). (In Russian).

- [4] G.I. Raab // *Physics and Technique of High Pressures* **15(1)** (2004) 72. (In Russian).
- [5] G.I. Raab, F.F. Safin, R.Z. Valiev // *Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure* **6** (2006) 41. (In Russian).
- [6] A.V. Botkin, G.I. Raab, A.N. Abramov, R.Z. Valiev // *Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure* **6** (2009) 3. (In Russian).
- [7] A.V. Botkin, R.Z. Valiev, A.N. Abramov, G.I. Raab // *Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure* **11** (2009) 8. (In Russian).
- [8] S.C. Yoon, C.H. Bok, M.H. Seo, T.S. Kim, H.S. Kim // *Materials Transactions* **49(5)** (2008) 963.
- [9] P.R. Cetlin, M.T.P. Aguilar, R.B. Figueiredo, T.G. Langton // *Journal of Materials Science* **45** (2010) 4561.
- [10] I.A. Ovid'ko, A.G. Sheinerman // *Materials Physics and Mechanics* **21(3)** (2014) 248.
- [11] V.L. Kolmogorov *Mechanics of Metal Forming* (USTU Publ., Ekaterinburg, 2001). (In Russian).
- [12] B.I. Beresnev, E.D. Martinov, K.P. Rodionov, *Plastichnost i prochnost tverdih tel pri visokikh davleniyah* (Nauka, Moscow, 1970). (In Russian).
- [13] N.V. Biba, S.A. Stebunov, S.V. Smirnov, In: *Simulation of Materials Processing. Theory, Methods and Applications*, ed. by Kenichiro Mori (Swets and Zeitinger, Lisse, Netherlands, 2001), p. 351.
- [14] V.A. Ogorodnikov, *Otsenka deformiruemosti metallov pri obrabotke davleniem* (Vischa shkola .Glavnoe izd-vo, Kiev, 1983). (In Russian).
- [15] M.G. Cockcroft, D.J. Latham // *Journal of the Institute of Metals* **96** (1968) 33.
- [16] A.A. Bogatov, *Mechanicheskie svoistva i modeli razrushenija metallov*. Uch. posobie. (VPO UGTU - UPI, Yekaterinburg, 2002). (In Russian).
- [17] S.I. Oh, C.C. Chen, S. Kobayashi // *Journal of Engineering for Industry-Transactions of the ASME* **101** (1979) 36.
- [18] R. Hambli, M. Reszka // *International Journal of Mechanical Sciences* **44** (2002) 1349.
- [19] N. Ogawa, M. Shiomi, K. Osakada // *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **42** (2002) 607.
- [20] H. Kim, M. Yamanaka, T. Altan, In: *Proceedings of NAMRC* (Society of Manufacturing Engineers, Houghton, Michigan, USA, 1995), p. 63.
- [21] S. Alexandrov, D. Vilotic // *Journal of Mechanical Engineering Science* **222** (2008) 1869.
- [22] A.V. Botkin, R.Z. Valiev, P.S. Stepin, A.Kh. Baimukhametov // *Deformation and fracture of materials* **7** (2011) 17. (In Russian).
- [23] R.Z. Valiev, N.K. Trenev, In: *Hot Deformation of Aluminum Alloys*, eds. T.G. Langton, H.D. Merchant, J.G. Morris, M.A. Zaidi (TMS, Warrendale, PA, USA, 1991) 319.
- [24] R.Z. Valiev, N.A. Krasilnikov, N.K. Trenev // *Materials Science and Engineering A* **317** (1991) 35.
- [25] R.Z. Valiev, F. Chmelik, F. Bordeaux, G. Kapelski, B. Baudelet // *Scripta Metallurgica et Materialia* **27** (1992) 855.
- [26] H.S. Kim, M.H. Seo, S.I. Hong // *Materials Science and Engineering A* **291** (2000) 86.
- [27] H.S. Kim, S.I. Hong, M.H. Seo // *Journal of Materials Research* **16** (2001) 856.
- [28] S.J. Oh, S.B. Kang // *Materials Science and Engineering A* **343** (2003) 107.
- [29] V.M. Segal // *Materials Science and Engineering A* **386** (2004) 269.
- [30] H.S. Kim, Y. Estrin // *Materials Science and Engineering A* **410–411** (2005) 285.
- [31] R.Y. Lapovok // *Journal of Materials Science* **40** (2005) 341.
- [32] License. P. C. SFTS. Key#9190/ Ufa, Russia.
- [33] D.F. Puzirkov, V.Yu. Sholom, D.G. Tulenev, A.N. Abramov // *Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure* **5** (1999) 22. (In Russian).