

А. В. Боткин, Р. З. Валиев, Г. И. Рааб, А. А. Кубликова, С. В. Дубинина

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА В ПРОЦЕССЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ДЛИННОМЕРНОЙ ЗАГОТОВКИ РАВНОКАНАЛЬНЫМ УГЛОВЫМ ПРЕССОВАНИЕМ КОНФОРМ

Приведена методика определения рациональных термических и механических условий деформации длинномерной заготовки равноканальным угловым прессованием по схеме Конформ для получения УМЗ структуры металла с приемлемой деформационной поврежденностью. Показано хорошее согласование результатов определения термических и механических условий деформации металла и данных физического эксперимента. *Процесс интенсивной пластической деформации; равноканальное угловое прессование по схеме Конформ; прогнозирование разрушения металла; материальная точка; напряженное состояние; поврежденность; компьютерное моделирование*

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 [1–6].

Процессы ИПД осуществляют при температурах ниже температуры рекристаллизации металла и [7–10]. 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 ($\epsilon_i \geq 8$), что является необходимым условием при формировании ультрамелкозернистой структуры материала.

Весьма актуальным вопросом при разработке процессов ИПД полуфабрикатов и последующего пластического формоизменения наноструктурных заготовок в операциях обработки металлов давлением (ОМД) является прогнозирование разрушения 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 по схеме Конформ (РКУП-К) [11–12] или при выполнении последующей операции ОМД.

Исследование разрушения металла при большой пластической деформации актуально для понимания сути процессов, происходящих при обработке металлов давлением, позволяет обоснованно подходить к выбору рациональных способов и режимов пластического формоизменения, обеспечивающих приемлемую поврежденность металла и, как следствие, высокие механические свойства металла и эксплуатационные характеристики изделий.

Предельные деформации в процессах интенсивной пластической деформации (ИПД) ограничиваются вязким разрушением металла. Вязкое разрушение металла сопровождается развитием и увеличением количества микропор и микротрещин, относительный объем которых в единице объема металла характеризуется поврежденностью металла.

В отечественной и зарубежной литературе к настоящему времени опубликовано достаточно много моделей, с помощью которых можно оценивать поврежденность (повреждаемость или использованный ресурс пластичности) металла [13–25].

В практике расчетов в нашей стране наибольшее распространение получили методики оценки поврежденности металла – В. Л. Колмогорова [15], А. А. Богатова [26], за рубежом – Cockroft & Latham [22, 27–29], которая установлена в программном комплексе DEFORM 3D по умолчанию как основная методика 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 [26].

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

В работе [30] предложен алгоритм использования модели разрушения металла Cockroft & Latham [27], позволяющий учитывать при расчете поврежденности металла изменяющееся напряженное состояние материальной точки заготовки.

Цель данной работы – показать применимость методики, разработанной на основе модели поврежденности металла [30], для определения благоприятных термических и механических условий деформации металла при получении длинномерных УМЗ заготовок в процессе РКУП-К.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

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

В процессе исследований выполняли компьютерное моделирование процесса РКУП-К заготовки с использованием программного комплекса DEFORM 3D [31] и физический эксперимент.

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

- заготовка – пластичное тело;
- кривую упрочнения сплава при 200 °С, полученную экспериментально, $\sigma_s = 1217\Lambda^{0,027}$ вводили при подготовке базы данных в виде табличной функции;
- инструмент (см. 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 200 °С; тепловым эффектом деформации из-за малой скорости деформации пренебрегали;
- коэффициент трения принимали $f = 0,5$;
- количество конечных элементов – 75000;
- количество шагов моделирования – 4500.

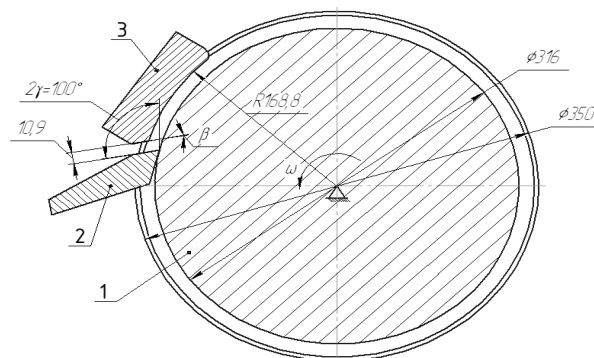


Рис. 1. Схема инструмента РКУП-К для прессования заготовок прямоугольного сечения: 1 – ротор; 2 – упор; 3 – прижим

Поврежденность рассчитывали по формуле, полученной в работе [30]:

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

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 Cockroft & Latham на k -м этапе деформирования материальной точки заготовки, $\varepsilon_{i,k}$ – интенсивность деформации, накопленной материальной точкой заготовки к началу k -го этапа деформирования, $\varepsilon_{i,k+1}$ – интенсивность 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 -м этапе деформирования материальной точки заготовки, $\varepsilon_{i,p}$ – интенсивность деформации, накопленной материальной точкой образца при испытании к моменту разрушения при постоянном значении показателя напряженного состояния σ_1 / σ_i :

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

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

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

– функции, определяющие пластичность сплава ВТ-6 при температурах 200, 300 и 400 °С соответственно, устанавливали экспериментально по методике, приведенной в работе [30].

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 [30]:

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

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

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА ПОВРЕЖДЕННОСТИ МЕТАЛЛА

Максимальное значение показателя Cockcroft & Latham $c = \int_0^{\varepsilon_i} \frac{\sigma_1}{\sigma_i} d\varepsilon_i$ – показателя поврежденности металла, наблюдается в области заготовки, примыкающей при РКУП-К к внутреннему углу матрицы (рис. 2, а).

Поэтому расчет поврежденности металла выполняли для материальной точки, выбранной именно из этой области заготовки (рис. 2, а).

Показатель поврежденности C указанной материальной точки заготовки не изменяется, когда точка находится в сужающемся выходном канале матрицы (рис. 1) – в зоне растяжения очага деформации, интенсивно увеличивается на 1 и 4 проходах РКУП-К, когда точка находится в зоне сдвига очага деформации (рис. 3).

Интенсивному увеличению показателя поврежденности c на каждом проходе способствует действие положительного нормального напряжения σ_1 (рис. 3–4).

При расчете поврежденности металла время прохождения материальной точки заготовки через очаг деформации за четыре прохода представляли 110 этапами деформирования с длительностью этапа t_3 , 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, 300 и 400 °С, получили равными 0,331, 0,31 и 0,2572 соответственно.

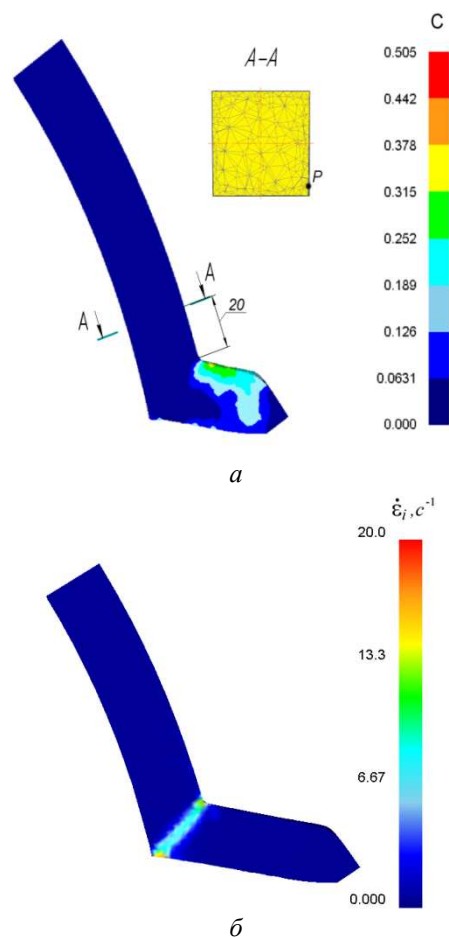


Рис. 2. Схема положения материальной точки и распределение показателя поврежденности металла и интенсивности скорости деформации в заготовке: а – распределение показателя Cockcroft & Latham C в продольном сечении деформированной заготовки, начальное положение материальной точки; б – распределение интенсивности скорости деформации в продольном сечении заготовки

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, 300 и 400 °С составили 0,9739, 0,9344 и 0,8258 соответственно. Таким образом, можно сделать три прохода без опасения снижения прочностных характеристик, тогда как в четвертом проходе РКУП-К существует вероятность разрушения материала, так как значение поврежденности близко к единице (табл. 1). Физический эксперимент показал, что разрушение заготовки при температуре 200 °С происходит во время осуществления четвертого прохода РКУП-К (рис. 5).

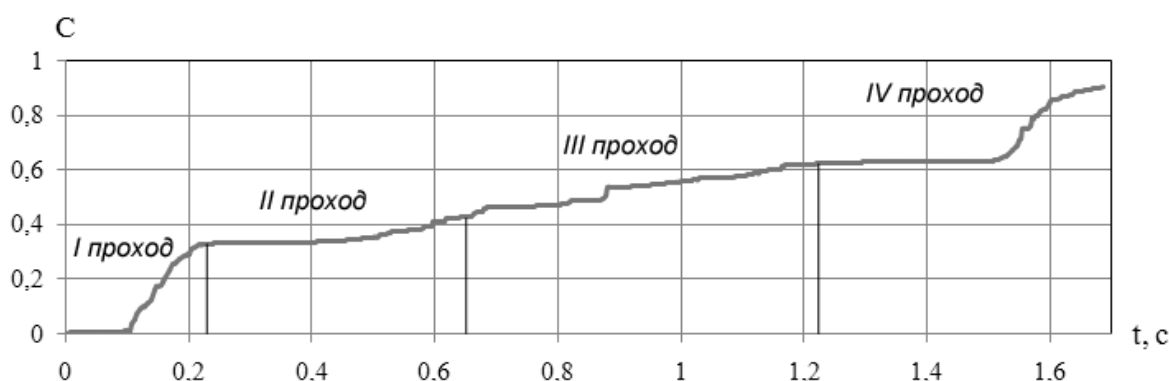


Рис. 3. Графическая зависимость показателя поврежденности s материальной точки от времени

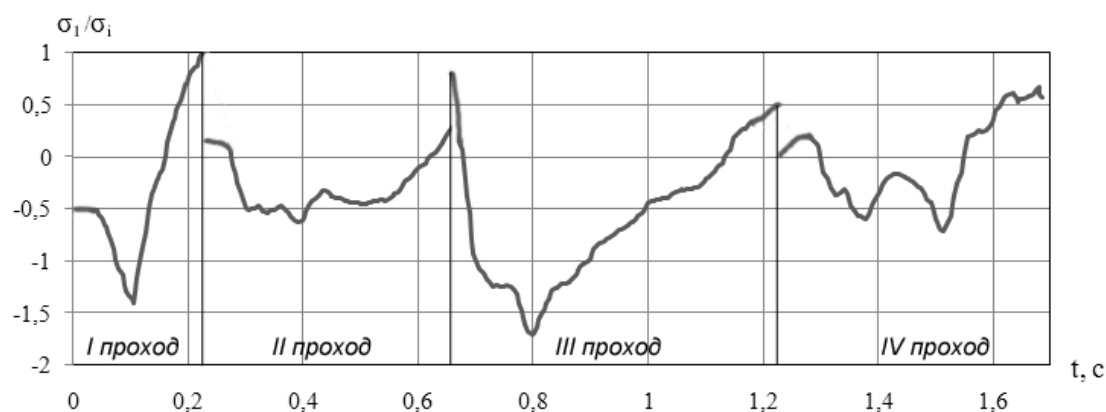


Рис. 4. Графическая зависимость показателя напряженного состояния σ_1/σ_i материальной точки от времени

Таблица 1

Значения поврежденности металла за четыре прохода при разных температурах обработки

Температура обработки, °С	Число проходов РКУП-К			
	1	2	3	4
200	0,331	0,4197	0,516	0,9739
300	0,31	0,3973	0,4909	0,9344
400	0,2572	0,3403	0,4256	0,8258



Рис. 5. Заготовки, полученные после четырех проходов РКУП-К

ВЫВОДЫ

1. Предлагаемая методика оценки поврежденности металла позволяет выбрать рациональные режимы обработки, т. е. благоприятную температуру обработки, угол пересечения каналов, угол сужения выходного канала и др.
2. Результаты расчета поврежденности металла при РКУП-К хорошо согласуются с экспериментальными данными, что подтверждает применимость данной методики при разработке технологии РКУП-К.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Процессы пластического структурообразования металлов / В. М. Сегал [и др.]. Минск: Наука і тэхніка, 1994. 232 с.
2. Валиев Р. З., Александров И. В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. М: Логос, 2000. 272 с.
3. Винтовая экструзия – процесс накопления деформации / Я. Е. Бейгельзимер [и др.]. Донецк. Фирма ТЕАН, 2003. 87 с.

4. **Носова Н. И., Мулюков Р. Р.** Субмикрорекристаллические и нанокристаллические металлы и сплавы. Екатеринбург: Уро РАН, 2003. 279 с.
5. **Андриевский Р. А., Рагуля А. В.** Наноструктурные материалы. М.: Academia, 2005. 192 с.
6. **Валиев Р. З., Александров И. В.** Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. 398 с.
7. **Рааб Г. И.** К вопросу промышленного получения объемных ультрамелкозернистых материалов // Физика и техника высоких давлений. 2004. Т. 15, № 1. С. 72–80.
8. **Рааб Г. И., Сафин Ф. Ф., Валиев Р. З.** Моделирование процесса равноканального углового прессования по схеме «Конформ» титановой длинномерной заготовки // КШП. 2006. № 6. С. 41–44.
9. Деформационные и силовые параметры процесса равноканального углового прессования в параллельных каналах / А. В. Боткин [и др.] // КШП. ОМД. 2009. № 6. С. 3–7.
10. Деформационные и силовые параметры процесса равноканального углового прессования длинномерной заготовки по схеме «Conform» / А. В. Боткин [и др.] // КШП. ОМД. 2009. № 11. С. 8–14.
11. Comparison in Deformation and Fracture Behavior of Magnesium during Equal Channel Angular Pressing by Experimental and Numerical Methods / S. C. Yoon [et al.] // Mater. Transactions. 2008. Vol. 49, № 5. P. 963–966.
12. A voiding cracks and inhomogeneities in billets processed by ECAP / P. R. Cetlin [et al.] // J. Mater. Sci. 2010. № 45. P. 4561–4570.
13. **Смирнов-Аляев Г. А.** Механические основы пластической обработки металлов. Л.: Машиностроение, 1968. 272 с.
14. **Колмогоров В. Л.** Напряжения, деформации, разрушение. М.: Металлургия, 1970. 229 с.
15. **Колмогоров В. Л.** Механика обработки металлов давлением. Екатеринбург: Изд-во Уральск. гос. техн. ун-та – УПИ, 2001. 836 с.
16. **Колмогоров В. Л.** Численное моделирование больших пластических деформаций и разрушения металлов // Кузнечно-штамповочное производство. 2003. № 2. С. 4–16.
17. **Кутсаар А. Р., Шалимова А. В.** Залечивание пор в меди высоким гидростатическим давлением // Физика металлов и металловедение. 1972. Т. 33. Вып. 6. С. 1322–1334.
18. Пластичность и прочность твердых тел при высоких давлениях / Б. И. Береснев [и др.]. М.: Наука, 1970. 62 с.
19. **Smirnov S. V., Domilovskaya T. V., Bogatov A. A.** Definition of the form for kinetic equation of damage during the plastic deformation // Advanced Methods in Materials Processing Defects edited by M. Redeleanu and P. Gilormini. Elsevier Science B.V., 1997. P. 71–80.
20. **Biba N. V., Stebunov S. A., Smirnov S. V.** Application of adaptive damage theory for optimization of cold bulk metal forming // Simulation of Materials Processing. Theory, Methods and Applications Ken-ichiro Mori (ed.) Publisher: Swets and Zeitinger (Nether lands), Lisse, 2001. P. 351–355.
21. **Огородников В. А.** Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. К.: Выща шк., 1983. 175 с.
22. **Cockcroft M. G., Latham D. J.** Ductility and Workability of metals // J. Inst. Metals. 1968. V. 96. P. 33–39.
23. **Калпин Ю. Г., Филипов Ю. К., Безубов Н. Н.** Оценка деформационной способности металла в процессах холодной объемной штамповки // ВНИИТЭМР. 1988. Серия 3, вып. 10. С. 1–7.
24. **Михалевич В. М.** Модели накопления повреждений для тел с начальной и деформационной анизотропией // Изв. АН СССР. Металлы. 1993. № 5. С. 144–151.
25. **Огородников В. А., Нахайчук О. В., Любин М. В.** Використаний ресурс пластичности металлу в процессе выдавливания внутришньої ризи. Вестник ВПИ. 1998. № 1. С. 68–72.
26. **Богатов А. А.** Механические свойства и модели разрушения металлов: учеб. пособие. Екатеринбург: ГОУВПО УГТУ – УПИ, 2002. 329 с.
27. **Oh S. I., Chen C. C., Kobayashi S.** Ductile fracture in axisymmetric extrusion and drawing. Part 2: workability in extrusion and drawing. ASME j. Eng. Ind. 1979. № 101. P. 36–44.
28. **Hambli R., Reszka M.** Fracture criteria identification using an inverse technique method and blanking experiment // Int. J. Mech. Sci. 2002. № 44. P. 1349–1361.

29. **Ogawa N., Shiomi M., Osakada K.** Forming limit of magnesium alloy at elevated temperatures for forging // *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2002. № 42. P. 607–614.

30. Оценка поврежденности металла при холодной пластической деформации с использованием модели разрушения Кокрофт-Латам / А. В. Боткин [и др.] // *Деформация и разрушение материалов.* 2011. № 7. С. 17–22.

31. Лицензия. Р. С. SFTS. Key#9190/ Ufa, Russia.

ОБ АВТОРАХ

Боткин Александр Васильевич, доц. каф. нанотехнологий. Дипл. инженер-механик (УАИ, 1986). Канд. техн. наук (Московск. авиац. технологическ. Ин-т им. К. Э. Циолковского, 1992). Иссл. в обл. обработки металлов давлением.

Валиев Руслан Зуфарович, проф., зав. той же каф., науч. рук. ИФПМ, чл.-кор. АН РБ. Дипл. инженер-металлург (УПИ, 1971). Д-р физ.-мат. наук (ИПМ АН УССР, 1984). Иссл. в обл. объемн. нанострукт. наноматериалов.

Рааб Георгий Иосифович, зав. лаб. интенсивных деформаций Ин-та физики перспективных материалов. Дипл. инженер-механик (УАИ, 1977). Д-р техн. наук (Москва, 2010). Иссл. в обл. обработки металлов давлением.

Кубликова Анастасия Александровна, асп. каф. нанотехнологий. Иссл. в обл. обработки металлов давлением.

Дубинина Светлана Владимировна, асп. той же каф. Иссл. в обл. обработки металлов давлением.