

Влияние реологических параметров поверхностного слоя структурно-неоднородных заготовок на силовые и деформационные характеристики при пластической деформации

Н. П. Барыкин, А. Х. Валеева, И. Ш. Валеев

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия

На основе математического моделирования процесса изотермической осадки симметричной структурно-неоднородной заготовки из сплава АМгб с различными реологическими свойствами слоев определяются коэффициенты скоростной чувствительности и деформационного упрочнения материала поверхностного слоя с мелкозернистой структурой, обеспечивающие при максимальных значениях показателя контактного трения существенное уменьшение уровня нормальных контактных напряжений и скалярного параметра поврежденности (степени использования ресурса пластичности) изделия. Обосновывается возможность использования электроимпульсной обработки для получения эффективного модифицированного поверхностного слоя.

Ключевые слова: структурно-неоднородная заготовка, математическое моделирование, коэффициенты скоростной чувствительности и деформационного упрочнения, скалярный параметр поврежденности, электроимпульсная обработка.

Обозначения

- A_1, A_2 – константы материала поверхностного и центрального слоев
 D_0 – исходный диаметр заготовки
 H_0 – исходная высота заготовки
 D_0/H_0 – соотношение геометрических размеров заготовки
 F_Z – показатель трения по Зибелю
 h_0 – толщина поверхностного слоя
 k_1 – показатель напряженного состояния
 m_1, m_2 – коэффициенты скоростной чувствительности материала поверхностного и центрального слоев
 n_1, n_2 – коэффициенты деформационного упрочнения материала поверхностного и центрального слоев
 v_z, v_{II} – нормальные составляющие скорости перемещения деформируемого объекта и инструмента
 ξ – скорость деформации
 σ_n^{\max} – максимальные нормальные напряжения на поверхности контакта с инструментом
 φ_1, φ_2 – относительные сужения материала поверхностного и центрального слоев
 τ_k – напряжение трения
 $\psi(t)$ – скалярный параметр поврежденности материала
 ψ_2^{\max} – скалярный параметр поврежденности центрального слоя

Введение. Одной из важных проблем машиностроения является повышение надежности изделий, определяемой в значительной степени технологией изготовления. При изготовлении изделий методами обработки давлением ресурс во многом зависит от возможности управления контактным взаимодействием, включая механическое взаимодействие модифицированного приповерхностного слоя по сопрягаемым с инструментом поверхностям. Модифицирование контактных поверхностей может быть реализовано различными способами. В частности, благодаря применению поверхностно-активных смазочных материалов, поверхностной пластической обработки, приводящей к образованию поверхностного слоя с регламентированной мелкозернистой структурой, обеспечивающего снижение значений степени деформирования и скалярного параметра поврежденности материала заготовки при горячей пластической деформации. Установлено [1], что значительное влияние на эффективность воздействия поверхностного слоя оказывает коэффициент скоростной чувствительности основного материала. Однако опыт практической реализации технологий деформирования структурно-неоднородных и градиентных материалов показывает, что наряду с оценкой влияния коэффициента скоростной чувствительности необходимо учитывать влияние деформационного упрочнения.

Одним из эффективных способов создания регламентированной мелкозернистой структуры материала поверхностного слоя в условиях горячей деформации является электроимпульсная обработка (ЭИО) [2, 3]. С целью оценки возможности использования ЭИО для повышения эффективности процесса изотермической штамповки проводилось математическое моделирование осадки структурно-неоднородной заготовки, поверхностному слою которой задавались реологические параметры материала после ЭИО.

Постановка задачи. Постановка задачи приведена ранее [1]. Для прогнозирования влияния реологических параметров поверхностного слоя на технологические свойства при пластической деформации использовали конечноэлементную модель осесимметричной изотермической осадки трехслойной заготовки с различными реологическими параметрами центрального и поверхностных слоев. Реологические соотношения для материалов поверхностных и центрального слоев задаются соответственно в виде универсальной зависимости:

$$\sigma_{s1} = A_1 \xi_{i1}^{m_1} (1 + \varepsilon_{i1})^{n_1}; \quad (1)$$

$$\sigma_{s2} = A_2 \xi_{i2}^{m_2} (1 + \varepsilon_{i2})^{n_2}, \quad (2)$$

где σ_{s1} , σ_{s2} – напряжения течения; ε_{i1} , ε_{i2} и ξ_{i1} , ξ_{i2} – интенсивности деформации и скоростей деформации соответственно; A_1 , m_1 , n_1 , A_2 , m_2 , n_2 – реологические параметры материалов соответственно поверхностных и центрального слоев с различной степенью дисперсности структурного состояния.

Степень использования ресурса пластичности при пластической деформации $\psi(t)$, как скалярный параметр поврежденности, определяли для монотонной деформации из соотношения [4]

$$\psi(t) = \Lambda / \Lambda_p, \quad (3)$$

где Λ_p – степень деформации сдвига, соответствующая разрушению (показатель пластичности металла); $\Lambda = \int_0^t H dt$ – степень деформации сдвига, соответствующая моменту времени t .

При вычислении предельной степени деформации сдвига Λ_p использовали приближенную зависимость [5]

$$\Lambda_p = 2\sqrt{3} \ln\left(\frac{1}{1-\varphi}\right) e^{-1,2k}, \quad (4)$$

связывающую Λ_p с показателем напряженного состояния $k = \sigma/T$ при известных значениях относительного сужения материала φ , принимаемых как $\varphi_1 = \varphi_2 = 0,5$.

В качестве материала центрального слоя использовали модель жестко-пластической среды: $m_2 = n_2 = 0$, $\sigma_s = A_2$, что позволило исключить влияние параметров материала этого слоя (m_2 , n_2) при варьировании реологическим состоянием поверхностных слоев. Расчеты проводили при изменении коэффициента деформационного упрочнения n_1 и коэффициента скоростной чувствительности m_1 в диапазоне 0...0,9; при этом зависимость (1) позволяет оценить совокупное влияние коэффициентов m_1 и n_1 на напряженно-деформированное состояние (НДС) при осадке. Рассматривали высокую заготовку с соотношением геометрических размеров $D_0/H_0 = 0,5$, среднюю заготовку с $D_0/H_0 = 2$ и низкую заготовку с $D_0/H_0 = 5$. Толщина поверхностного слоя h_0 составляла 0,1 от исходной высоты заготовки. Принимали следующие граничные условия на поверхности контакта с инструментом: $v_3 = v_n$; $\tau_k = F_Z \sigma_{sl} / \sqrt{3}$, где v_3 , v_n – нормальные составляющие скорости перемещения деформируемого объекта и инструмента на поверхности контакта; F_Z – показатель трения по Зибелю, принимался равным 0,9, что приближается к условиям трения без смазочного материала. (При решении задачи принимали значения реологических параметров материала центрального слоя, соответствующие алюминиевому сплаву АМг6 (6,0% Al, 0,6% Mg, Mn) при температуре 375°C и средней скорости деформации $\dot{\xi} = 2 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$ [6].) Задавали следующие значения технологических параметров: скорость деформации $v_n = 0,1$ мм/с; величина относительного обжатия заготовки $\varepsilon = 0,5$. Материал инструмента полагали абсолютно жестким телом.

Для промышленного алюминиевого сплава АМг6 стандартного химического состава проводили подготовку структуры по методике [2]. Размер зерна после отжига в печи составлял 8–10 мкм, после ЭИО – 2–3 мкм.

Реологические параметры m , n и A для сплава АМг6 после стандартного отжига в печи и ЭИО определяли при обработке начального участка кривых растяжения по методике, описанной в [7] (рис. 1). Расчеты проводили по результатам испытаний при температуре 375°C и различных скоростях деформации (таблица).

Параметры A , m и n для сплава АМг6

Вид термообработки	A	m	n
Стандартный отжиг	160	0,27	0,18
ЭИО	145	0,49	0,10

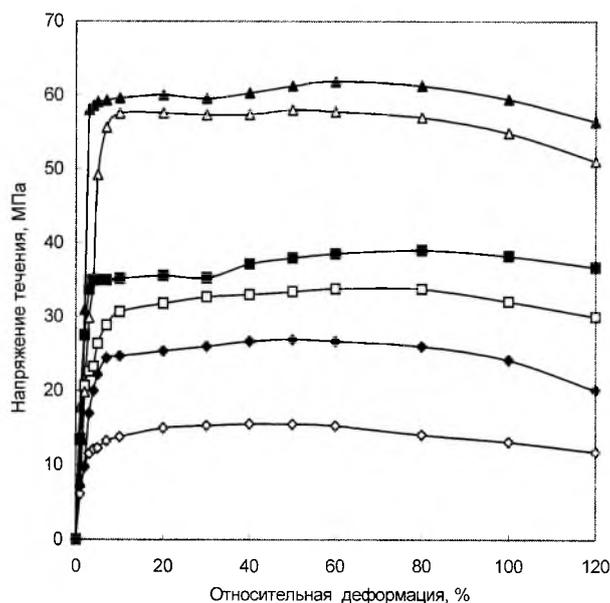


Рис. 1. Кривые растяжения образцов из сплава АМг6 при $T = 375^{\circ}\text{C}$: \diamond , \blacklozenge — $\dot{\xi} = 8 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$; \square , \blacksquare — $\dot{\xi} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$; \triangle , \blacktriangle — $\dot{\xi} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ c}^{-1}$. (Светлые точки — после ЭИО; темные — после отжига в печи.)

Результаты математического моделирования и их обсуждение. На рис. 2, 3 приведены зависимости максимальных значений нормальных напряжений σ_n^{\max} на контактной поверхности и скалярного параметра поврежденности центрального слоя ψ_2^{\max} от коэффициентов скоростной чувствительности m_1 и деформационного упрочнения n_1 материала поверхностного слоя.

Как видно из рис. 2, увеличение коэффициента скоростной чувствительности материала поверхностного слоя m_1 приводит к снижению нормальных напряжений при соотношении геометрических размеров $D_0/H_0 = 2$ и 5. В то же время с увеличением значений коэффициента деформационного упрочнения n_1 материала поверхностного слоя нормальные напряжения для всех рассмотренных значений m_1 повышаются. При этом для средней и низкой заготовок с ростом n_1 в интервале 0...0,9 значения σ_n^{\max} увеличиваются примерно в 1,5 раза во всем диапазоне изменения коэффициента скоростной чувствительности материала поверхностного слоя (0,1...0,9) — рис. 2,б,в.

Для высокой заготовки только слой с $m_1 = 0,9$ и $n_1 \leq 0,1$ позволяет получить значение скалярного параметра поврежденности центрального слоя

на уровне $\leq 0,3$, которую можно устранить при рекристаллизационном отжиге [4]. Для всех рассмотренных значений m_1 скалярный параметр поврежденности монотонно возрастает с увеличением n_1 (рис. 3,а). Для заготовки с $D_0/H_0=2$ приемлемые значения скалярного параметра поврежденности получены для $m_1=0,5$ при $n_1 \leq 0,4$ и $m_1=0,9$ при $n_1 \leq 0,6$ (рис. 3,б), в то время как для низкой заготовки значение скалярного параметра поврежденности меньше 0,2 при всех значениях коэффициентов m_1 и n_1 (рис. 3,в).

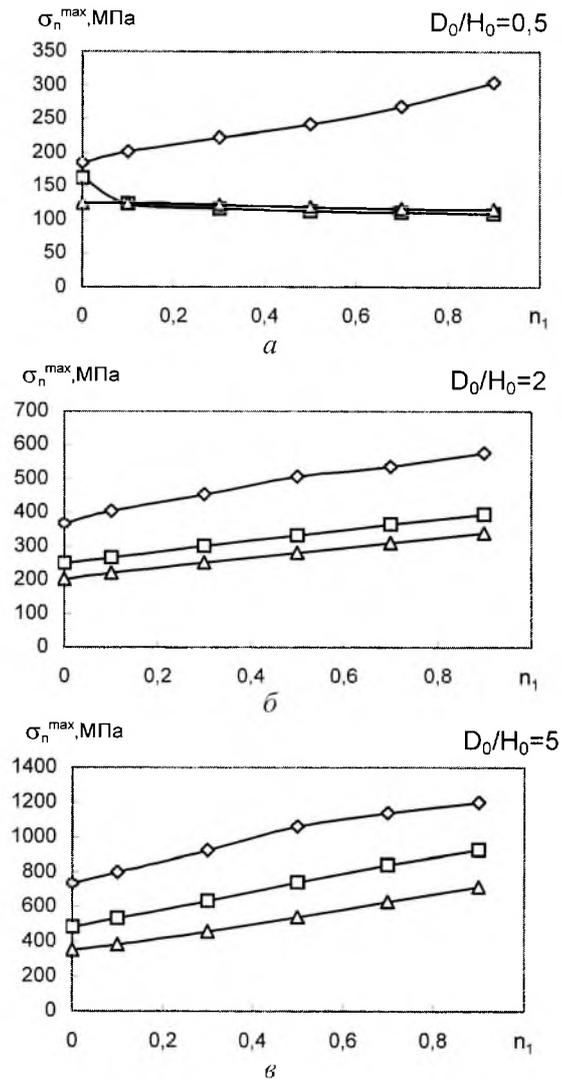


Рис. 2. Зависимость максимальных значений нормальных напряжений σ_n^{\max} от коэффициентов n_1 и m_1 . (Здесь и на рис. 3: $\diamond m_1 = 0,1$; $\square m_1 = 0,5$; $\triangle m_1 = 0,9$.)

Приведенные результаты численного моделирования показывают, что наибольшую эффективность при изотермической штамповке без смазки обеспечивает поверхностный слой, материал которого имеет высокие значения коэффициента скоростной чувствительности ($m_1 \geq 0,5$) и пониженный

коэффициент деформационного упрочнения ($n_1 \leq 0,3$). При этом уменьшаются нормальные напряжения и значения скалярного параметра поврежденности для всех исследуемых соотношений геометрических размеров деформируемой заготовки.

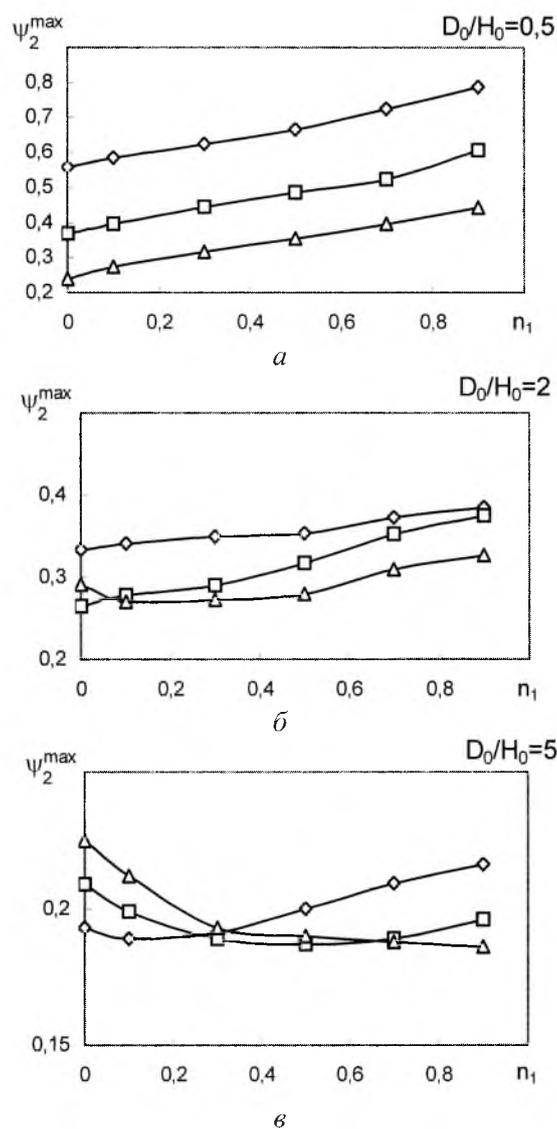


Рис. 3. Зависимость скалярного параметра поврежденности центрального слоя ψ_2^{\max} от коэффициентов n_1 и m_1 .

При исследовании влияния ЭИО поверхностного слоя на показатели технологической деформируемости структурно-неоднородной заготовки (СНЗ) из сплава АМг6 в процессе пластической деформации для задания реологических параметров центрального слоя использовали значения, соответствующие параметрам образцов после стандартного отжига, для поверхностных слоев – значения, вычисленные по кривым растяжения тонких

образцов после ЭИО. Для сравнения рассматривали однородную заготовку (ОЗ), при задании реологических параметров центрального и поверхностных слоев которой использовали одинаковые значения, вычисленные по кривым растяжения образцов после стандартного отжига. Расчеты проводили, задавая условия трения без смазочного материала ($F_Z = 0,9$) и при наличии смазки ($F_Z = 0,1$).

На рис. 4 представлена диаграмма, где сопоставлены максимальные значения скалярного параметра поврежденности и нормальные напряжения, полученные в результате математического моделирования. Видно, что при трении без смазочного материала наличие поверхностного слоя, обладающего свойствами материала после ЭИО, обеспечивает снижение скалярного параметра поврежденности центрального слоя для заготовки с $D_0/H_0 = 0,5$ примерно на 35% и с $D_0/H_0 = 2$ – на 50%, а также такой уровень значений скалярного параметра поврежденности изделий, который можно полностью устранить при рекристаллизационном отжиге. Причем снижение скалярного параметра поврежденности сопоставимо с тем, которое имеет место при использовании смазочного материала. Для $D_0/H_0 = 2$ и $0,5$ нормальные напряжения уменьшаются на 30%, для $D_0/H_0 = 5$ – примерно на 45%. Наличие смазочного материала для СНЗ приводит к дополнительному снижению нормальных напряжений и скалярного параметра поврежденности по сравнению с таковыми для ОЗ. Нормальные напряжения для всех рассмотренных соотношений геометрических размеров уменьшаются незначительно: для $D_0/H_0 = 5$ примерно на 20%, для $D_0/H_0 = 2$ – на 10% (рис. 4,б); для $D_0/H_0 = 0,5$ скалярный параметр поврежденности составляет 20%, для $D_0/H_0 = 2$ – 10%, для $D_0/H_0 = 5$ – примерно 5%.

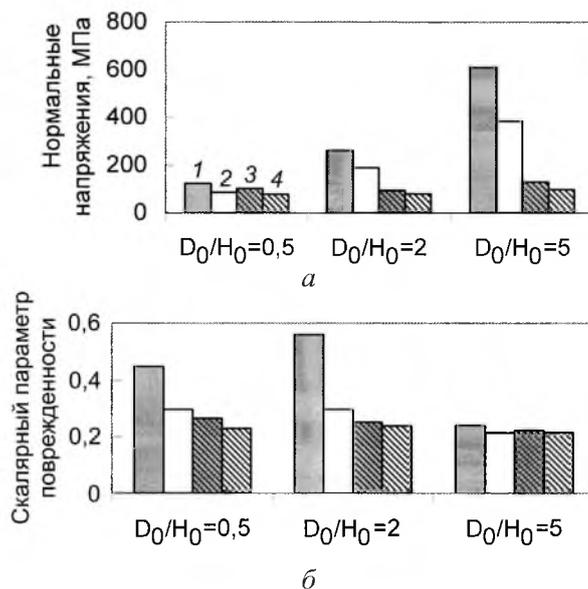


Рис. 4. Значения нормальных напряжений (а) и скалярного параметра поврежденности (б) однородной (1, 3) и структурно-неоднородной (2, 4) заготовок: 1, 2 – $F_Z = 0,9$; 3, 4 – $F_Z = 0,1$. ($T = 375^\circ\text{C}$; $\xi = 4 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$; $\varepsilon = 50\%$; $v_{II} = 1 \text{ мм/с}$.)

На основе результатов математического моделирования можно предположить, что наличие поверхностного слоя с регламентированной мелкозернистой структурой при отсутствии смазочного материала приводит к локализации сдвиговых напряжений в приконтактной области, вследствие чего происходит снижение нормальных напряжений и скалярного параметра поврежденности в основном объеме изделия.

Выводы

1. Установлено, что поверхностный слой, материал которого обладает коэффициентом скоростной чувствительности $m_1 \geq 0,5$, коэффициентом деформационного упрочнения $n_1 \leq 0,3$ и толщиной h_0 не более 0,1 высоты исходной заготовки, обеспечивает значения скалярного параметра поврежденности изделий на уровне $\leq 0,3$.

2. По результатам проведенного математического моделирования можно определить наиболее эффективный способ подготовки структуры поверхности изделия с целью повышения его ресурса и снижения нормальных напряжений в условиях трения без смазочного материала.

3. Электроимпульсная обработка в диапазоне плотностей тока 1...10 кА/мм² при длительности импульсов $\sim 10^{-4}$ с – один из эффективных способов подготовки поверхностного слоя с регламентированной мелкозернистой структурой (средний размер зерна 1 мкм) при реализации процессов деформации в условиях трения как без смазочного материала, так и при его наличии.

Резюме

На основі математичного моделювання процесу ізотермічної осадки симетричної структурно-неоднорідної заготовки зі сплаву АМгб із різними реологічними властивостями шарів визначаються коефіцієнти швидкісної чутливості та деформаційного зміцнення матеріалу поверхневого шару з дрібнозернистою структурою, які забезпечують при максимальних значеннях показника контактної тертя суттєве зменшення рівня нормальних контактних напружень і скалярного параметра пошкодження (ступеня використання ресурсу пластичності). Обґрунтовується можливість використання електроімпульсної обробки з метою отримання ефективного модифікованого поверхневого шару.

1. Барыкин Н. П., Валеева А. Х. Численное моделирование контактного взаимодействия инструмента и пластически деформируемого тела через прослойку из вязкопластического материала // Трение и износ. – 2002. – № 6. – С. 629 – 634.
2. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. – М.: Мир, 1972. – 392 с.
3. Камалов З. Г., Валеев И. Ш. Изменение структурного состояния меди под действием мощных импульсов тока // Физ.-хим. обраб. металлов. – 2000. – № 2. – С. 67 – 72.

4. Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением. – Екатеринбург: Изд-во УГТН-УПИ, 2001. – 836 с.
5. Лабутин А. А., Кортаев Ф. Ф., Гуляев Г. П. О прогнозировании ресурса разрушения при пластической деформации металлов // Исследования в области пластичности и ОМД. – Тула, 1975. – Вып. 3. – С. 95 – 98.
6. Полухин П. И., Гун Г. Я., Галкин А. М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. Справочник. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
7. Васин Р. А., Еникеев Ф. У., Мазурский М. И. Методика определения величины параметра скоростной чувствительности сверхпластичного материала из начального участка кривых напряжение–деформация // Завод. лаб. – 1997. – № 1. – С. 44 – 48.

Поступила 08. 11. 2006