

УДК 621.77

Матвийчук В. А.
Михалевич В. М.
Алиева Л. И.

ОЦЕНКА ДЕФОРМИРУЕМОСТИ МАТЕРИАЛА ЗАГОТОВОК, ПОЛУЧЕННЫХ ОТДЕЛЕНИЕМ МЕТОДАМИ ПЛАСТИЧЕСКОГО СДВИГА

В процессах обработки металлов давлением (ОМД) часто заготовки под последующее деформирование получают безотходным пластическим отделением от прутка, трубы, листа и пр. При этом в зоне пластического отделения происходит исчерпание ресурса пластичности металла и его разрушение. Полученные таким образом заготовки могут подвергаться обработке методами ОМД в силу следующих причин: во-первых, слой с исчерпанным ресурсом пластичности относительно тонкий и обычно не определяет качества всей заготовки; во-вторых, на последующей операции происходит изменение монотонности деформирования, что повышает суммарный ресурс пластичности; в-третьих, перед дальнейшим деформированием может осуществляться удаление поврежденного поверхностного слоя. Тем не менее, для более полного использования технологических возможностей процессов ОМД и обеспечения необходимого качества изделий следует знать закономерности накопления повреждаемости металлов и уметь определять величину остаточного ресурса пластичности материала заготовок, отделенных пластическим сдвигом. Особенно это важно, если отделение пластическим сдвигом является отдельной операцией комбинированного технологического процесса.

При отделении заготовок пластическим сдвигом характер напряженно-деформированного состояния (НДС) и толщина деформированного слоя существенно зависят от параметров процесса и свойств металла [1]. Закономерности накопления повреждений металлов при немонотонном деформировании и оценка их остаточной пластичности достаточно хорошо описываются тензорно-нелинейными моделями [2]. Вместе с тем, вопросы оценки деформируемости металлов в технологических процессах с немонотонным деформированием изучены недостаточно. Не изучено, также, влияние слоя металла, исчерпавшего при пластическом сдвиге ресурс пластичности, на деформируемость заготовок при их последующей обработке давлением.

Задача оценки деформируемости и уровня накопленных повреждений материала заготовок, обрабатываемых методами ОМД после пластического отделения, состоит из трех отдельных задач:

1. Определение НДС материала заготовки.
2. Определение уровня накопленных повреждений с применением некоторой математической модели, определяемой принятым законом суммирования повреждений (критерия деформируемости [2, 3]).
3. Экспериментальное уточнение коэффициентов модели с учетом толщины поврежденного при пластическом сдвиге слоя материала и характера напряженного состояния при отделении и последующем деформировании заготовки.

Целью данной работы является оценка способности металлов подвергаться последующей пластической обработке после исчерпания ресурса пластичности на заготовительной операции.

Исследование процесса образования и развития трещин в слоях металла после сдвиговой отрезки производили путём разработки и исследования математической модели анизотропного накопления повреждений, учитывающей особенности немонотонного деформирования.

Рассмотрим приближённую модель исследуемого процесса в виде простого двухэтапного деформирования, используя для этого соотношение, которое базируется на степенном представлении функции повреждённости [2].

$$\psi_{*2} = \left[(\psi_1 \cdot \alpha_{12})^{n_2} - \psi_1^{n_1} \cdot I_{12} + \sqrt{\psi_1^{2n_1} \cdot (I_{12}^2 - 1) + 1} \right]^{1/n_2} - \psi_1 \cdot \alpha_{12}. \quad (1)$$

Здесь $\psi_1 = \varepsilon_u^{(1)} / \varepsilon_* (\eta^{(1)})$ – использованный ресурс предельных деформаций на первом этапе;

$\psi_{*2} = (\varepsilon_* - \varepsilon_u^{(1)}) / \varepsilon_{*c} (\eta^{(2)})$ – остаточный ресурс предельных деформаций на втором этапе;

ε_* – расчетное значение накопленной пластической деформации до разрушения, при данном процессе сложного деформирования;

$\alpha_{12} = \varepsilon_* (\eta^{(1)}) / \varepsilon_* (\eta^{(2)})$ – материальная константа;

I_{12} – инвариантный параметр, который определяется направляющими тензорами $\beta_{ij}^{(1)}$ и $\beta_{ij}^{(2)}$, а также параметром модели b ;

n_1 и n_2 – параметры модели, определяемые по результатам экспериментов при немонотонном деформировании.

Принимаем параметр функции поврежденности независимым от напряжённого состояния, то есть:

$$n_1 = n_2 = n. \quad (2)$$

Очевидно, что при срезе происходит полное исчерпание ресурса пластичности на сдвиг, следовательно:

$$\psi_1 = 1. \quad (3)$$

Тогда с учётом (2) и (3) соотношение (1) принимает вид:

$$\psi_{*2} = \left[\alpha_{12}^n - I_{12} + |I_{12}| \right]^{1/n} - \alpha_{12} \quad (4)$$

Для определения параметра I_{12} запишем компоненты направляющего тензора на первом и втором этапах. Срез:

$$\beta_{ij}^{(1)} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

сжатие:

$$\beta_{ij}^{(2)} = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{6}}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{6}}{6} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sqrt{6}}{6} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

С учётом (5) и (6), в соответствии с соотношением для расчёта параметра I_{12} [2], получим:

$$I_{12} = -\frac{\sqrt{6}}{12} b_1. \quad (7)$$

Для всех $b_1 \geq 0$ ($|b_1| \leq \sqrt{6}$) [2] соотношение (4) принимает вид:

$$\psi_{*2} = \left[\alpha_{12}^n + \frac{\sqrt{6}}{6} b_1 \right]^{1/n} - \alpha_{12}. \quad (8)$$

На рис. 1 представлены графики изменения остаточного ресурса пластичности в зависимости от значений параметров n та b_1 . Таким образом (рис. 1), расчётные значения остаточного ресурса увеличиваются по мере увеличения b_1 и уменьшения n .

При максимально возможном значении $b_1 = \sqrt{6}$ соотношение (8) принимает вид:

$$\psi_{*2} = [\alpha_{12}^n + 1]^{1/n} - \alpha_{12}, \quad (9)$$

откуда вытекает:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \psi_{*2} = \begin{cases} 1 - \alpha_{12}, & 0 < \alpha_{12} < 1, \\ 0, & \alpha_{12} \geq 1. \end{cases} \quad (10)$$

При $n = 1$, на основании соотношения (8), имеем:

$$\psi_{*2}(n=1) = \frac{\sqrt{6}}{6} b_1. \quad (11)$$

Из последнего соотношения следует, что остаточный ресурс пластичности для определённых материалов может достигать 1 (но не больше).

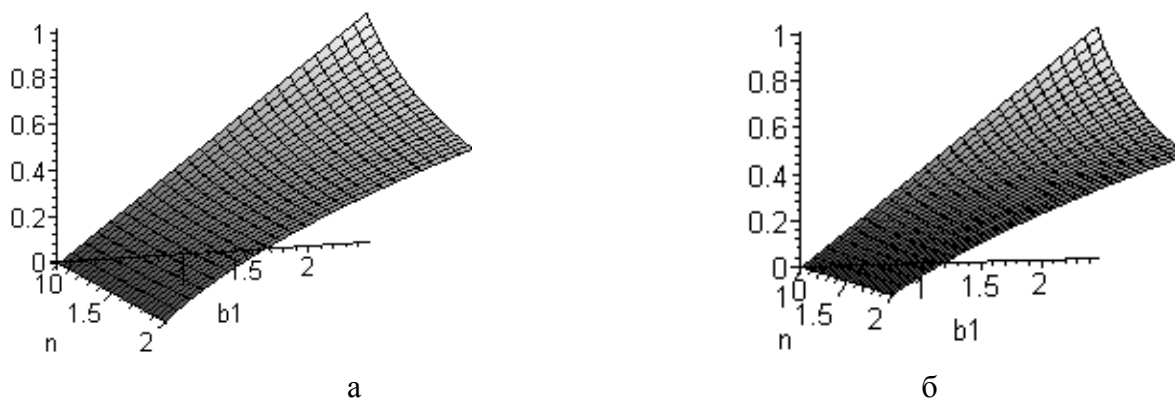


Рис. 1. Графики изменения остаточного ресурса пластичности в зависимости от значений параметров n и b_1 : сплав ЭП718, $\alpha_{12} = 0,42$ (а); сталь ЭИ961, $\alpha_{12} = 0,6$ (б)

Для экспериментального исследования влияния пластического сдвига на остаточный ресурс пластичности предложен способ [4], схематически представленный на рис. 2.

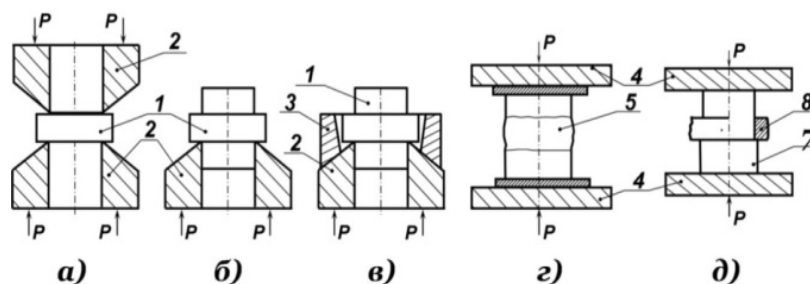


Рис. 2. Схемы получения (а), (б), (в) и испытания на пластичность (г), (д) образцов с образованной сдвиговым срезом поверхностью:

1 – образец исходный; 2 – пуансон-матрица; 3 – оправка; 4 – плиты; 5 – образец для осадки; 7 – деформируемая оправка; 8 – образец для раздачи

Схемы удаления фланца, представленные на рис. 2, а–в, позволяют реализовать различное напряжённое состояние в зоне среза. В соответствии со схемами 2а, 2б, 2в, удаление

фланца происходит, преимущественно, в условиях сдвига, сдвига со смятием и сдвига с наложением бокового подпора (сжатия) соответственно.

Исследование зоны среза производили методом измерения микротвердости и микроструктурным анализом. По величине интенсивности деформаций в зоне среза и с использованием диаграмм пластичности была определена средняя величина показателя напряженного состояния η_c , при которой происходил срез. Для исследуемых схем среза величина показателя находилась в пределах $-0,5 \leq \eta_c \leq 0,5$ (наиболее мягкое напряженное состояние наблюдалось при схеме 2в, наиболее жесткое – 2б).

Полученные после пластического среза буртика цилиндрические образцы исследовали на пластичность в условиях равномерного одноосного сжатия и осадки с трением на торцах. При достижении определенного уровня деформаций на поверхности среза образовывались микротрещины длиной $\approx 0,5$ мм. Деформирование до более значительных деформаций приводило к образованию трещин, которые выходили за пределы поверхности среза, в результате происходило разрушение материала образцов.

Результаты исследований представлены в табл. 1. Здесь ψ_2^M, ψ_2 – использованный ресурс пластичности на этапе осадки в момент образования микротрещин и разрушения материала, соответственно; η_2^M, η_2 – значение показателя напряженного состояния на стадии образовании микротрещин в момент, предшествующий разрушению материала. Для реализации каждого из путей деформирования, отображенных отдельной строкой в табл. 1, использовали три образца.

Приведенные выше результаты приближенного математического моделирования полностью согласуются с результатами экспериментов для сложного двухэтапного деформирования «срез – одноосное сжатие» (табл. 1).

Для учёта истории деформирования в случае, когда на втором этапе, в результате трения на торцах образца, происходит не простое сжатие, а сложное деформирование, необходимо строить более сложную модель накопления повреждений.

Таблица 1

Значения остаточного ресурса пластичности материала в зоне среза при комбинации сдвиг-сжатие (схема рис. 2, г, образец 5)

Марка сплава	Параметры деформирования сплава			
	η_2^M	ψ_2^M	η_2	ψ_2
ЭП718	-0,9	0,25	-0,45	0,52
	-0,45	0,23	0	0,47
ЭИ961	-1,0	0,31	-0,95	0,6
	-0,7	0,25	-0,5	0,61
ВТ9	-0,95	0,48	-0,9	0,6
	-0,6	0,47	-0,4	0,62
ВТ25	-0,95	0,3	-0,9	0,63
	-0,5	0,35	-0,3	0,63

Поскольку реализованная в эксперименте схема сложного двухэтапного деформирования отвечает последовательности «простое-сложное», то используем построенную в работе [3] модель:

$$\psi_u = \left(\frac{\varepsilon_u^{(1)}}{\varepsilon_{*1}} \right)^{2n} + 2 \cdot \left(\frac{\varepsilon_u^{(1)}}{\varepsilon_{*1}} \right)^{2n} \cdot \left[a^{(1)} \cdot \beta_{ij}^{(1)} + b^{(1)} \cdot \left(\beta_{ik}^{(1)} \cdot \beta_{kj}^{(1)} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \right) \right] \cdot \psi_{ij}^{(2)} + \psi_u^{(2)}, \quad (12)$$

где

$$\psi_{ij}^{(2)} = \int_{\varepsilon_u^{(1)}}^{\varepsilon_u^{(2)}} \left[A(\varepsilon_u) \cdot \beta_{ij}(\varepsilon_u) + B(\varepsilon_u) \cdot \left(\beta_{ik}(\varepsilon_u) \cdot \beta_{kj}(\varepsilon_u) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \right) \right] d\varepsilon_u, \quad (13)$$

При исчерпании ресурса пластичности на первом этапе будем иметь

$$\varepsilon_u^{(1)} = \varepsilon_{*1} = \varepsilon(\eta = 0) \Rightarrow \frac{\varepsilon_u^{(1)}}{\varepsilon_{*1}} = 1, \quad (14)$$

$$a^{(1)} = \sqrt{1 - \frac{(b^{(1)})^2}{6}}, \quad (15)$$

тензор $\beta_{ij}^{(1)}$ определяется соотношением (5).

Для определения компонентов тензора $\psi_{ij}^{(2)}$ воспользуемся результатами работы [2]:

$$\psi_z = \int_{\gamma_1}^{\gamma_*} \frac{F \cdot g}{\cos^2 \gamma} \left[\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot a^{(2)} + \frac{b^{(2)}}{3} \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{1+3\cos^4 \gamma}} - 1 \right) \right] d\gamma, \quad (16)$$

$$\psi_\varphi = \int_{\gamma_1}^{\gamma_*} \frac{F \cdot g}{\cos^2 \gamma} \left[\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{a^{(2)}}{2} \cdot (1+3\cos^2 \gamma) + \frac{b^{(2)}}{3} \cdot \left(\frac{(1+3\cos^2 \gamma)^2}{2 \cdot \sqrt{1+3\cos^4 \gamma}} - 1 \right) \right] d\gamma, \quad (17)$$

где γ – некоторый параметр процесса осадки;

F – производная от функции повреждений.

Функцию повреждений в данной работе принято в виде степенной функции, следовательно:

$$F = \frac{n}{\varepsilon_*[\eta]} \left(\frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_*[\eta]} \right)^{n-1}, \quad n \geq 1. \quad (18)$$

Результаты расчётов по разработанной модели представлены на рис. 3.

Очевидно, что при наличии характерного для разрушения значительного разброса экспериментальных данных, здесь наблюдается полное согласование результатов экспериментов с разработанной моделью. Следовательно, разработанная модель накопления повреждений является вполне приемлемой для оценки деформируемости металлов при немономтонном деформировании, когда на последующем после пластического сдвига этапе имеет место сложное деформирование.

Приведенные в табл. 1 результаты совпадают также с результатами экспериментов при комбинации кручение – сжатие цилиндрических образцов.

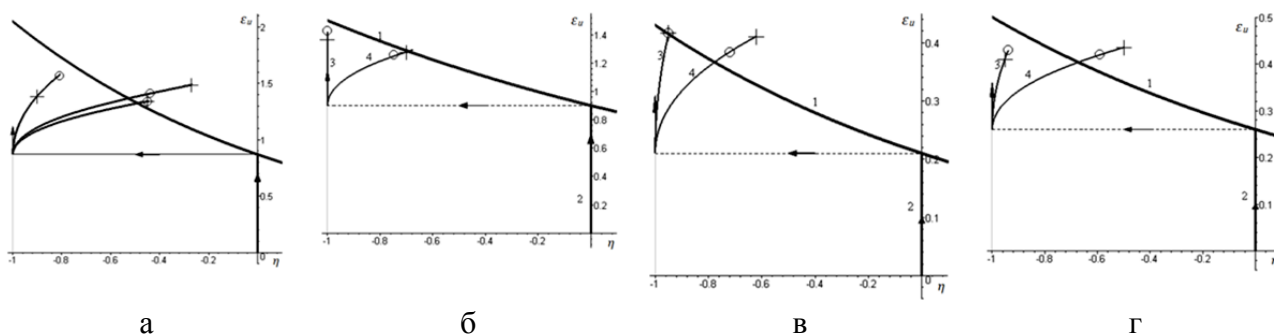


Рис. 3. Сложное двухэтапное деформирование: срез буртика – осадка: "+" – эксперимент, "O" – расчёт по (13) и (14)–(18); а) сплав ЭП718; б) сталь ЭИ961; в) сплав ВТ9; г) сплав ВТ25:

1 – диаграмма пластичности сплава; 2 – операция «сдвиг» (срез буртика); 3, 4 – операция «осадка» с разными условиями трения на торцах образца

То есть заготовки, поврежденные на относительную глубину 10–15 % при срезе сдвигом, показали такую же остаточную пластичность при осадке, как и доведенные до разрушения кручением цилиндрические образцы. При этом остаточный ресурс пластичности не зависит от величины предельной деформации на сжатие металла в исходном состоянии, однако несколько уменьшается с увеличением чувствительности предельных деформаций к схеме напряженного состояния.

Применение восстановительной термообработки после операции среза полностью восстанавливает ресурс пластичности материала под операцию осадки.

Нами была исследована также комбинация срез-растяжение. Для этого кольцевые образцы, с образованной срезом внешней поверхностью, подвергали раздаче на оправке (рис. 2, д, образец 8). Остаточный под растяжение ресурс пластичности при этом оказался весьма незначительным ($\psi_2 \approx 0$), что также согласовывается с расчетными значениями.

ВЫВОДЫ

Разработаны общие соотношения тензорной модели суммирования повреждений в металлах при сложном двухэтапном деформировании. Получено соотношение для определения остаточного ресурса пластичности при сжатии заготовок, слой материала которых исчерпал ресурс пластичности при сдвиге. Разработана математическая модель суммирования повреждений в металле для комбинации сдвиг – осадка в условиях изменяющегося напряженного состояния. Полученные критериальные соотношения подтверждены экспериментально и могут быть использованы для оценки деформируемости заготовок, полученных безотходными методами сдвиговой отрезки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимошенко В. А. *Нарастание деформации и разрушение заготовки при разрезке* / В. А. Тимошенко // *Изв. Вузов. Чёрная металлургия.* – 1989. – № 8. – С. 87–90.
2. Михалевич В. М. *Тензорні моделі накопичення пошкоджень* / В. М. Михалевич. – *Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1998.* – 195 с.
3. Матвийчук В. А. *Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов: монография* / В. А. Матвийчук, И. С. Алиев. – *Краматорск : ДГМА, 2009.* – 268 с.
4. А. с. 1587392, МКИ G 01 N 3/24. *Способ оценки деформируемости материала* / В. А. Матвийчук, В. А. Фомичёв, А. Ф. Шаваран (СССР). – № 4617602/25-28 ; заявл. 08.12.88 ; опубл. 23.08.90 ; Бюл. № 31.

Матвийчук В. А. – д-р техн. наук, проф. ВНАУ;

Михалевич В. М. – д-р техн. наук, проф. ВНТУ;

Алиева Л. И. – канд. техн. наук, доц., докторант ДГМА.

ВНАУ – Винницкий национальный аграрный университет, г. Винница.

ВНТУ – Винницкий национальный технический университет, г. Винница.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: vmykhal@gmail.com; leyla-ukr@mail.ru