

трения вдоль и поперек следов обработки, но в любом случае она меньше, чем для схемы, представленной на рис. 4, в.

Результаты теоретического анализа формоизменения кольцевых образцов при осадке с различными условиями трения достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными. Таким образом, за счет нанесения ориентированной шероховатости на гравюру штампа можно получать необходимое направление смещения металла при осадке. Полученные результаты могут быть также использованы при восстановлении изношенных деталей пластической деформацией с использованием операции осадки, при доводке штампов в случае возникновения брака, связанного с незаполнением ручья при штамповке. Доводку штампа осуществляют путем создания зон прилипания и скольжения де-

формируемого металла в определенных областях гравюры.

Анализ формы эллипса трения и формул (8) и (9) позволяет сделать вывод, что величина τ_0 имеет максимум при $\tau_0 = \tau_{\perp}$. Следовательно, для создания зон затрудненного течения необходимо, чтобы направление следов обработки на гравюре инструмента было перпендикулярно потокам металла при пластической деформации. Деформирование в этом случае следует осуществлять без применения технологического смазочного материала (ТСМ). Появление зон скольжения возможно при $\tau_0 = \tau_{//}$. При этом следы обработки на гравюре штампа должны быть направлены параллельно течению металла при пластической деформации; деформирование следует осуществлять с применением ТСМ.

УДК 621.735.32.001.24

Я. Г. ЖБАНКОВ, Л. И. АЛИЕВА, кандидаты техн. наук (Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск, Украина); В. М. МИХАЛЕВИЧ, д-р техн. наук (Винницкий национальный технический университет, г. Винница, Украина)
E-mail: yzhbankov@gmail.com

Восстановление пластичности при изотермическом горячем дробном деформировании

Разработан метод, позволяющий рассчитывать предельное формоизменение заготовки в процессах дробного деформирования с учетом восстановления пластичности в паузах между единичными обжатиями (проходами), продолжительности этих пауз и величин дробных деформаций. Результаты расчета процесса дробной осадки заготовки с использованием предложенного метода хорошо согласуются с экспериментальными данными.

The method of a blank forming limit calculation in the processes of fractional forming taking into account plasticity recovery in intervals between reductions per die (drafts), duration of such intervals and values of fractional deformation is developed. Results of calculation of process of a blank fractional upsetting with using the method offered are close to experimental results.

Ключевые слова: горячее деформирование; восстановление пластичности; дробное деформирование; осадка; обжатие; степень деформации.

Key words: hot forming; plasticity recovery; fractional forming; upsetting; reduction; deformation ratio.

При горячей обработке заготовок из различных сталей и сплавов, в частности при ковке крупных поковок, в ряде случаев применяют дробное деформирование, т. е. деформирование с паузами, во время которых про-

исходит разупрочнение металла, что позволяет существенно снизить силу деформирования [1, 2]. Чаще всего дробное деформирование применяют при осадке, которая является наиболее энергоемкой операциейковки.

Помимо эффекта разупрочнения при горячем дробном деформировании по сравнению с монотонным деформированием повышается пластичность материала. В первую очередь этот эффект проявляется при обработке заготовок из специальных малопластичных сталей и сплавов [3]. Дробность деформации при ковке характеризуется величиной (степенью) единичных обжатий, т. е. обжатий за один удар бойка (при ковке на молоте) или за одно нажатие пресса, а также паузами между ними. При прокатке дробность деформации характеризуется числом проходов и величиной обжатия в каждом проходе. Чем ниже пластичность металла, тем больше должна быть дробность деформации.

В работе [3] физический смысл этого явления объясняется тем, что малые степени единичных обжатий позволяют осуществлять деформирование при меньшем количестве препятствий движению дислокаций и скольжению и меньших значениях упрочнения и скалывающих напряжений, а увеличение количества пауз обеспечивает большее разупрочнение деформируемого материала. Кроме того, снижение скорости деформации и повышение ее дробности способствуют протеканию процессов диффузии и восстановлению пластичности материала.

Практическим путем установлено [3], что при ковке на гидравлическом прессе поковок из конструкционных легированных сталей перлитного класса степень дробной деформации может составлять 30...60 %, а при ковке поковок из высоколегированных малопластичных сталей допустимая степень дробной деформации должна быть намного ниже — в пределах 6...10 %.

В работе [3] отмечено также, что для поковок из сплавов типа ЖС6КП положительные результаты и практически приемлемые значения предельной деформации достигаются только при многоцикловом дробном деформировании со степенью единичного обжатия 2...4 % и частыми подогревами между обжа-

тиями. При этом величины единичных обжатий для конкретного сплава предлагается определять экспериментально.

В работе [4] показано, что применение дробного деформирования при изготовлении поковок из малопластичных материалов, например из сплавов ЭИ319 и ЭИ437, может повысить их пластичность в 2...2,5 раза.

В работе [5] установлено, что во время паузы плотность дислокаций в деформируемом материале уменьшается, в результате чего увеличиваются пластичность и разупрочнение материала.

Одним из видов дробного деформирования является вибрационная ковка (осадка), которая позволяет увеличить равномерность распределения деформаций в заготовке, а также повысить деформируемость заготовки. К способам дробного деформирования относится также ковка на ротационных ковочных машинах.

Таким образом, дробное деформирование позволяет расширить возможности горячей обработки заготовок из различных сталей и сплавов, однако отсутствие соответствующего аналитического аппарата снижает эффективность внедрения и использования подобных технологий.

Цель настоящей работы — разработка метода оценки пластичности материала при изотермическом горячем дробном деформировании.

По данным работы [6], наиболее интенсивное восстановление пластичности происходит в начале паузы. Дальнейшее многократное увеличение длительности паузы обеспечивает лишь незначительное увеличение восстановленной пластичности (рис. 1). Кривые восста-

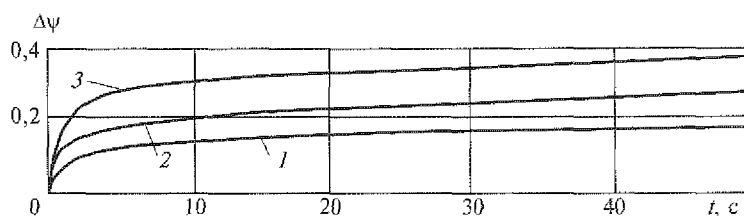


Рис. 1. Характер восстановления пластичности стали 13X11H2B2MФ-Ш в паузах при горячем деформировании:

1, 2, 3 — $T = 850, 900, 1100$ °C соответственно

новления пластичности можно описать уравнением следующего вида:

$$\Delta\psi = K(1 - e^{-m}), \quad (1)$$

где K — коэффициент, характеризующий предельное значение восстановления пластичности; t — продолжительность паузы; n — коэффициент, характеризующий скорость восстановления пластичности.

Результаты расчета по соотношению (1) практически совпадают с результатами расчета по более сложному соотношению [6]

$$\Delta\psi = \frac{\ln(1 + e^{s\psi_1}(e^{s\Delta_{п1}} - 1))}{s} - \Delta_{п1}, \quad (2)$$

где s — константа материала; $\Delta_{п1}$ — относительная длительность паузы; ψ_1 — использованный ресурс пластичности перед паузой.

Однако соотношение (2) обладает существенным недостатком. Оно выведено с использованием гипотезы полной обратимости процесса накопления повреждений при горячей деформации, вследствие чего согласно соотношению (2) получается, что при достаточно длительной паузе пластичность восстанавливается полностью независимо от уровня накопленных повреждений.

При холодной деформации существует критическая величина поврежденности, превышение которой уже не позволяет восстановить исходную пластичность путем термообработки [7]. Подобные предположения можно сделать и относительно горячей деформации. Полагаем, что максимальная величина $\Delta\psi$ при малых значениях ψ_i использованного ресурса пластичности на i -м этапе деформирования равна ψ_i , а при больших значениях ψ_i (близких к 1) стремится к 0. В этом случае коэффициент K в зависимости (1) принимает следующий вид:

$$K = m\psi_i, \text{ причем } \begin{cases} \psi_i = 0 \rightarrow m = 1; \\ \psi_i = 1 \rightarrow m = 0. \end{cases}$$

Графически это представлено на рис. 2.

Формула (1) в данном случае принимает следующий вид:

$$\Delta\psi = \psi_i m (1 - e^{-m}). \quad (3)$$

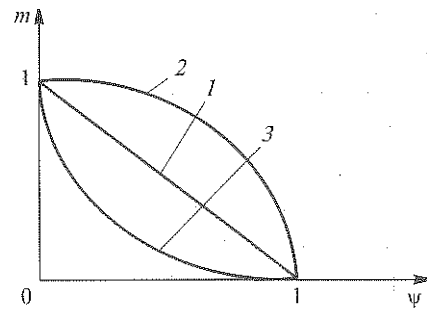


Рис. 2. Зависимости коэффициента m от предварительно использованного ресурса пластичности:

1 — линейная зависимость $m = 1 - \psi_i$; 2 и 3 — параболические зависимости $m = \sqrt{1 - \psi_i}$ и $m = (1 - \psi_i)^2$ соответственно

В общем случае параметры m и n определяются видом материала и температурой деформирования.

На основе проведенного анализа параметр m можно представить в следующем виде:

$$m = (1 - \psi_i)^{f(\psi_i, T)}, \quad (4)$$

где функция $f(\psi_i, T)$ является характеристикой материала, которую необходимо определять экспериментально.

Тогда выражение (3) примет вид

$$\Delta\psi = \psi_i (1 - \psi_i)^{f(\psi_i, T)} (1 - e^{-m}). \quad (5)$$

Для расчета коэффициентов в зависимости (5) величину восстановления пластичности необходимо определять по формуле

$$\Delta\psi = \psi_1 + \psi_{2*} - 1, \quad (6)$$

где ψ_1 — использованный ресурс пластичности материала перед паузой, $\psi_1 = \varepsilon_{и1}/\varepsilon_p$; $\varepsilon_{и1}$ — степень деформации образца до паузы, $\varepsilon_{и1} = \ln(l_1/l_0)$; l_0 и l_1 — соответственно исходная и полученная при растяжении перед паузой длины образца; ε_p — предельная степень деформации при монотонном растяжении образца, $\varepsilon_p = \ln(l_p/l_0)$; l_p — предельная длина образца при монотонном растяжении; ψ_{2*} — остаточный после окончания паузы ресурс пластичности, $\psi_{2*} = \frac{\varepsilon_{p2} - \varepsilon_{и1}}{\varepsilon_p}$; ε_{p2} — степень деформации, при которой произошло разру-

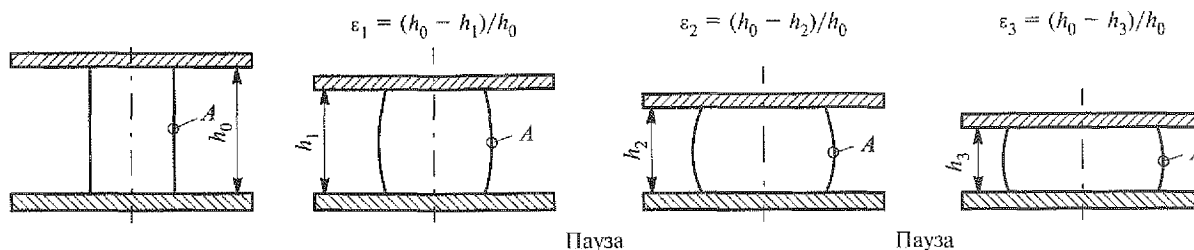


Рис. 3. Схема осадки цилиндрической заготовки с промежуточными паузами

шение образца после паузы, $\varepsilon_{p2} = \ln(l_{p2}/l_0)$; l_{p2} — предельная длина образца при растяжении с паузой.

Если восстановления пластичности не произошло, т. е. $\Delta\psi = 0$, то $\psi_1 + \psi_{2*} = 1$, или $(\varepsilon_{p2} - \varepsilon_{и1})/\varepsilon_p + \varepsilon_{и1}/\varepsilon_p = 1$. (7)

В этом случае длина образца, разрушившегося после паузы, должна равняться длине образца, разорванного при монотонном деформировании без паузы: $\varepsilon_{p2} = \varepsilon_p$. Тогда выражение (7) примет следующий вид:

$$\varepsilon_p/\varepsilon_p - \varepsilon_{и1}/\varepsilon_p + \varepsilon_{и1}/\varepsilon_p = 1.$$

После подстановки в зависимость (6) всех остальных приведенных выше выражений и проведения математических упрощений получим

$$\Delta\psi = \frac{\ln(l_{p2}/l_0)}{\ln(l_p/l_0)} - 1.$$

Практическое приложение изложенного метода рассмотрим на примере осадки цилиндрической заготовки (рис. 3). Для точки A , в которой вероятнее всего произойдет разрушение, определяем величину ψ_i , являющуюся функцией относительной степени осадки $\varepsilon_h = \Delta h/h_0$ (Δh — абсолютное обжатие заготовки за ход). В этой же точке можно определить величину интенсивности логарифмических деформаций ε_i .

После первой осадки и первой паузы степень восстановления пластичности можно рассчитать по зависимости

$$\Delta\psi_1 = \psi_1(1 - \psi_1)^{f(\psi_1, T)}(1 - e^{-m}),$$

где ψ_1 — использованный до паузы ресурс пластичности, $\psi_1 = \varepsilon_1/\varepsilon_p$; ε_p — предельная логарифмическая степень деформации.

Использованный ресурс пластичности после первой паузы определяем как разницу использованного до паузы и восстановленного к концу паузы ресурсов пластичности:

$$\psi_1^1 = \psi_1 - \Delta\psi_1.$$

После второй осадки во время паузы восстанавливаться будет ресурс пластичности ψ_2 , затраченный во время второй осадки. Однако с учетом того, что после первой осадки накопилась поврежденность материала, и предположив, что величины поврежденности обладают свойством аддитивности, из которого следует справедливость простого их суммирования, восстановленный и исчерпанный за две осадки ресурсы пластичности будут определяться соответственно следующими выражениями:

$$\Delta\psi_2 = (\psi_1^1 + \psi_2)(1 - \psi_1^1 - \psi_2)^{f(\psi_1^1 + \psi_2, T)} \times (1 - e^{-m});$$

$$\psi_2^1 = \psi_1^1 + \psi_2 - \Delta\psi_2.$$

Для k осадок

$$\psi_k^1 = \psi_{k-1}^1 + \psi_k - \Delta\psi_k, \quad (8)$$

причем $\psi_{k-1}^1 + \psi_k \leq 1$; если последнее условие не соблюдается, то восстановление пластичности не рассчитываем.

Для определения зависимости интенсивности логарифмических деформаций ε_i в точке A на боковой поверхности заготовки от относительной степени осадки ε_h проведено конечно-элементное моделирование процесса осадки цилиндрической заготовки диаметром 18 мм и высотой 20 мм из стали 45 при температуре 1100 °С со скоростью 1 мм/с. Ко-

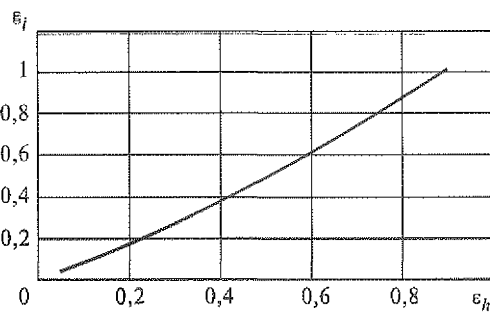


Рис. 4. Зависимость интенсивности деформаций от степени осадки

эфицент пластического трения по Зибелю при этом задавали равным 0,35.

В результате моделирования получены поля распределения интенсивности логарифмических деформаций в поперечном сечении заготовки и построена графическая зависимость ε_i от ε_h (рис. 4).

После обработки полученных данных выведена аналитическая зависимость ε_i от ε_h , которая для заданных температурно-скоростных условий принимает следующий вид:

$$\varepsilon_i = 0,3725\varepsilon_h^2 + 0,7977\varepsilon_h.$$

Для оценки повышения предельной степени деформации заготовки при дробной осадке рассмотрим вариантковки заготовки из стали У7 при постоянной температуре 1100 °С и скорости деформации, равной $6,6 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. По данным работы [5], полученным экспериментально при монотонном изотермическом растяжении цилиндрических образцов при указанных температуре и скорости деформации, предельная степень деформации составила 0,65.

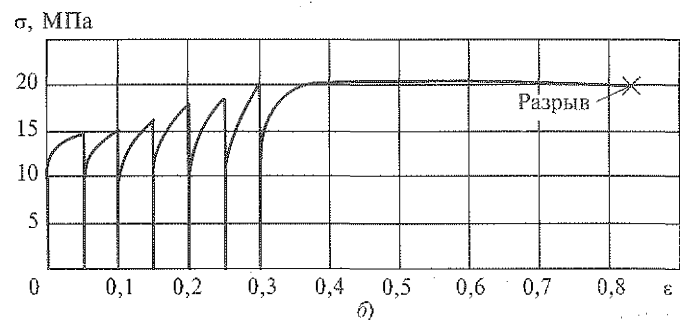
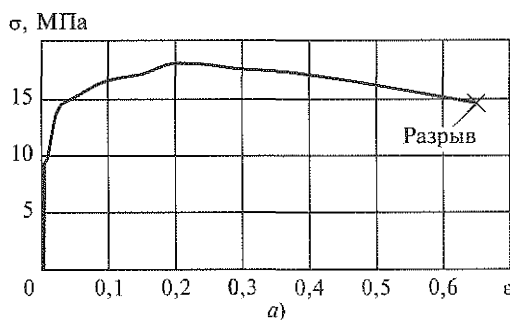


Рис. 5. Кривые упрочнения стали У7 при монотонном растяжении (а) и дробном деформировании (б)

Приняв допущение о том, что напряжения на периферийной поверхности бочки осаженой заготовки равны или близки к напряжениям при растяжении, можно считать, что при монотонной осадке заготовки разрушение наступит в тот момент, когда интенсивность деформаций ε_i в точке А достигнет критического значения, равного 0,65, что соответствует относительной степени осадки $\varepsilon_h = 0,63$.

Проверим возможность осадки заготовки с большей степенью деформации при использовании дробного деформирования. Для этого проведем расчет дробной осадки с величиной единичного относительного обжатия $\Delta\varepsilon_h = 0,25$ и с продолжительностью пауз между обжатиями $t = 60 \text{ с}$, используя зависимости (5)—(8). При этом примем допущение о том, что коэффициент m в формуле (3), который необходимо определять экспериментально, для рассматриваемых температуры и материала равен $1 - \psi_i$, т. е. функция $f(\psi_{i-1}^1 + \psi_i, T)$ в формулах (4), (5) равна 1, а параметр n принимает значения до 0,15.

В результате расчета установлено, что применение дробного деформирования в указанном режиме позволяет увеличить предельную степень осадки от 0,63 до 0,75, причем во время паузы после третьей осадки накопленная поврежденность снижается до 0,5937, что дает возможность провести дополнительную осадку. Предельную степень осадки можно увеличить еще больше путем соответствующего изменения дробности деформации.

Полученные результаты качественно подтверждаются экспериментальными данными, приведенными в работе [5] (рис. 5) для ука-

занных выше режимов монотонного и дробного деформирования.

Выводы. 1. Предложен метод оценки восстановления пластичности металла при горячем дробном деформировании, который позволяет прогнозировать предельное формоизменение заготовки в зависимости от степени дробности деформации и продолжительности пауз между этапами дробного деформирования.

2. Расчет процесса изотермической осадки цилиндрического образца показал, что по сравнению с монотонной осадкой при дробной осадке с единичным обжатием, равным 0,25, и продолжительностью пауз между осадками, равной 60 с, можно повысить предельную степень осадки от 0,63 до 0,75.

Список литературы

1. Соколов Л. Н. Упрочнение—разупрочнение при ковке // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Зб. наук. праць. Краматорськ: ДДМА, 2002. С. 183—187.
2. *Высокотемпературное упрочнение и разупрочнение металлов и сплавов: Справочник* / В. Н. Ефимов, Л. Н. Соколов, В. В. Савицкий, М. Л. Жадкевич. Киев: Наукова думка, 1992. 104 с.
3. Дзугутов М. Я. Пластическая деформация высоколегированных сталей и сплавов. М.: Металлургия, 1977. 480 с.
4. Легранд С. В. Исследование по жаропрочным сплавам. М., 1956.
5. Ефимов В. Н. Интенсификация и повышение эффективности процессов горячей обработки давлением металлов и сплавов на основе учета термического разупрочнения: Дис. ... д-ра техн. наук. Краматорск: ДГМА, 1986.
6. Михалевиц В. М. Тензорні моделі накопичення пошкоджень. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1998. 195 с.
7. Матвийчук В. А., Алиев И. С. Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов: Краматорск: ДГМА, 2009. 268 с.

УДК 621.983.1.001.24

А. А. КРУГЛОВ, канд. техн. наук (ИПСМ РАН, г. Уфа); Р. Ш. МУСИНА, студентка;
Ф. У. ЕНИКЕЕВ, д-р техн. наук (Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа)
E-mail: alweld@go.ru

Расчет оптимального режима сверхпластической формовки трехслойных конструкций с гофрированным наполнителем из титановых сплавов

Предложена методика расчета режима сверхпластической формовки трехслойной конструкции с гофрированным наполнителем, построенная в рамках основных предположений безмоментной теории оболочек. Методика предназначена для расчета закона подачи давления и инженерной оценки параметров напряженно-деформированного состояния в очаге деформации.

The article offers a method of analysis of a superplastic forming mode of 3-sheet structures with ridged filler constructed within the frames of basic assumptions of the theory of momentless shells. The method is meant for analysis of pressure time cycle and engineering evaluation of parameters of stress-strain state in the deformation zone.

Ключевые слова: сверхпластическая формовка; трехслойная конструкция; гофрированный наполнитель; закон подачи давления; напряженно-деформированное состояние.

Key words: superplastic forming; 3-sheet structure; ridged filler; pressure time cycle; stress-strain state.

Многослойные листовые конструкции в виде обшивок с внутренними ребрами жесткости из титановых, алюминиевых сплавов и стали перспективны для изготовления изделий высокой удельной прочности [1]. Они характеризуются существенно меньшей

массой, меньшей трудоемкостью изготовления, повышенной надежностью по сравнению с паяными или клепаными конструкциями.

Сверхпластическая формовка, совмещенная со сваркой давлением (СПФ/СД), является одним из эффективных способов об-