

УДК 539.374.001

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-СКОРОСТНЫХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ
ПАРАМЕТРОВ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ОБЪЕМНОЙ
СХЕМЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА**

Д.И. Чашников

Разработана методика определения температурно-скоростных и деформационных параметров сверхпластической деформации металлических материалов с учетом фактической схемы объемно-деформированного состояния металла, характерной для реальных процессов обработки металлов давлением.

Ключевые слова: деформация сверхпластическая; параметры температурно-скоростные; методика определения.

**DEFINITION OF TEMPERATURE STRAIN RATES AND DEFORMATION PARAMETERS
OF SUPERPLASTIC DEFORMATION AT THE VOLUME SCHEME OF STRESS STATES**

D.I. Chaschnikov

The technique of determination of temperature strain rates and deformation parameters of superplastic deformation of metal materials taking into account the actual scheme of the volume deformed condition of metal characteristic of real processing of metals is developed by pressure.

Keywords: deformation is superplastic; parameters temperature strain rates; a definition technique.

Существующие методы определения температурно-скоростных параметров сверхпластической деформации базируются на испытаниях по линейным схемам напряженного состояния: простого одноосного растяжения и одноосного сжатия (осадка образцов с выточками для смазки, что исключает их бочкообразование) [1–6]. Опробован также метод испытаний на кручение [7].

Использование явления сверхпластичности в процессах обработки металлов и сплавов давлением вышло из лабораторных рамок и находит применение в промышленных процессах: объемная и листовая штамповка, прессование, изотермическая раскатка и др. [2, 7–9]. Промышленные процессы обработки давлением, как известно, базируются на сложных схемах объемного напряженного состояния: неравноосного трехмерного сжатия, комбинированных схем с преобладанием сжимающих главных напряжений. Чаще всего в различных участках объема деформируемого тела возникают неодинаковые схемы напряженного состояния, поэтому в теории и практике обработки давлением принято говорить о преобладающей схеме объемного напряженного состояния и вво-

дится показатель среднего гидростатического давления $P = -(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ [6]. При трехмерном сжатии гидростатическое давление всегда положительно. Если гидростатическое давление положительно и велико, то можно достичь весьма больших степеней пластической деформации, не сопровождающихся разрушением. Положительное влияние роста гидростатического давления на деформационное поведение материала в процессах сверхпластической деформации наиболее ярко проявляется в значительном повышении скорости деформации (при переходе от одноосного растяжения к схеме одноосного сжатия скорость сверхпластической деформации, как правило, возрастает на порядок) и в подавлении нежелательного явления порообразования [10, 11].

Кроме того, и при сверхпластической деформации напряженно-деформированное состояние неоднородно по объему заготовки [12], а скорость деформации $\dot{\epsilon}$ при постоянной скорости деформирования ($V_d = \text{const}$) также меняется. При принятых методиках определения температурно-скоростных параметров развития эффекта сверхпластичности температура и скорость деформа-

ции устанавливаются на основании линейных схем напряженного состояния, что резко отличается от действительной картины напряженно-деформированного состояния в реальных процессах обработки металлов давлением. Последнее обстоятельство приводит к необходимости значительной корректировки параметров сверхпластической деформации уже в промышленных условиях, зачастую ставя под сомнение возможность использования количественных значений температурно-скоростного интервала сверхпластичности, полученных при растяжении в процессах объемной штамповки и при испытаниях на осадку в процессе листовой штамповки.

Особенно отличаются результаты определения температурно-скоростных параметров сверхпластичности, полученные при разных схемах напряженного состояния для металлов и сплавов, имеющих крупнозернистую неоднородную структуру. Так, испытания на растяжение литого металла (алюминиевого сплава 1561) показали отсутствие в нем проявления эффекта сверхпластичности во всем исследованном температурно-скоростном интервале, однако при исследованиях методом линейного сжатия в том же диапазоне температур и скоростей деформации установлено проявление эффекта сверхпластичности. Результаты этих испытаний были подтверждены экспериментами при продольной низкоскоростной прокатке клиновых образцов из литого сплава 1561 в изотермических условиях (подогрев валков).

При исследованиях явления сверхпластичности по принятым методикам количественные значения скоростного интервала, как правило, получают по показателю скорости деформации $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon / dt$, что в условиях производственной практики требует пересчета на параметры скорости деформирования (скорость перемещения инструмента) и степени деформации (абсолютное или относительное обжатие). В практической работе для расчетов маршрутов и инструмента в основном используются следующие параметры: температура, обжатие, скорость деформирования, силовые характеристики процессов.

Поэтому целесообразно создание методик определения температурно-скоростных и деформационных параметров реальных процессов сверхпластической деформации, основанных не на простых испытаниях методом растяжения или линейного сжатия, а на имитирующих способах, наиболее близко соответствующих тому или другому методу обработки по напряженно-деформированному состоянию и скоростным условиям нагружения [13].

Известно, что условиям производственных процессов продольной прокатки наиболее близко соответствует метод имитирующих лабораторных испытаний путем прокатки на клин или прокатки клиновых образцов [7, 14], результаты которого с известной степенью приближения могут быть использованы для оценки деформируемости близких по схеме напряженного состояния процессовковки, объемной штамповки и даже прессования. Метод прокатки клиновых образцов позволяет при испытании одного образца получить большой объем информации, а именно: зависимость силовых параметров от степени и скорости деформации, включая трансформацию структуры.

Прокатка образцов при варьировании температуры нагрева и деформации позволяет получить количественные связи силовых, температурно-скоростных и деформационных параметров при соответствующей схеме напряженно-деформированного состояния.

На рисунке 1 представлена типовая диаграмма зависимости полного давления металла на валок при горячей прокатке клиновых образцов при разных температурах t и скоростях деформирования n , где $t_1 > t_2 > t_3 > t_4$, а $n_1 < n_2$. Указанные зависимости характерны для прокатки клиновых образцов в обычном (не сверхпластичном) состоянии. По горизонтальной оси вместо снимаемого при осциллографировании времени наносятся соответствующие по длине прокатанного образца l значения относительного обжатия и скорости деформации. Относительное обжатие ε рассчитывают на основании геометрических размеров по высоте исходного клина и прокатанной полосы, а скорость деформации $\dot{\varepsilon}$ определяют по любой из известных формул (А.И. Целикова, Ю.М. Зароцинского, В.Н. Выдрина и др.) с учетом наличия или отсутствия уширения [15].

Наличие оси скорости деформации имеет скорее теоретическое значение, так как для практических целей достаточно установления взаимосвязи основных технологических параметров: усилия, скорости деформирования, температуры и степени деформации. Процесс деформации в условиях развития эффекта сверхпластичности, по-видимому, должен описываться при прокатке клиновых образцов типовой диаграммой другого вида, когда деформационное усилие не зависит от степени деформации, так как сопротивление сверхпластической деформации носит явно выраженную зависимость от скорости деформирования.

На рисунке 2 представлены типовые диаграммы различных возможных видов, полученные

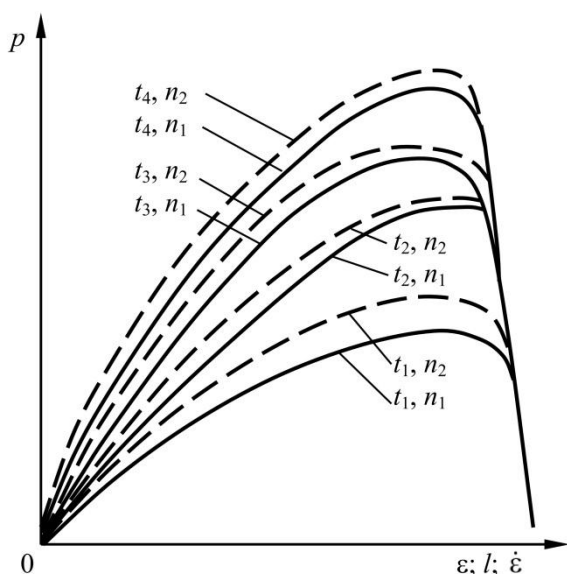


Рисунок 1 – Типовая диаграмма зависимости полного давления металла на волок при продольной прокатке клиновидного образца

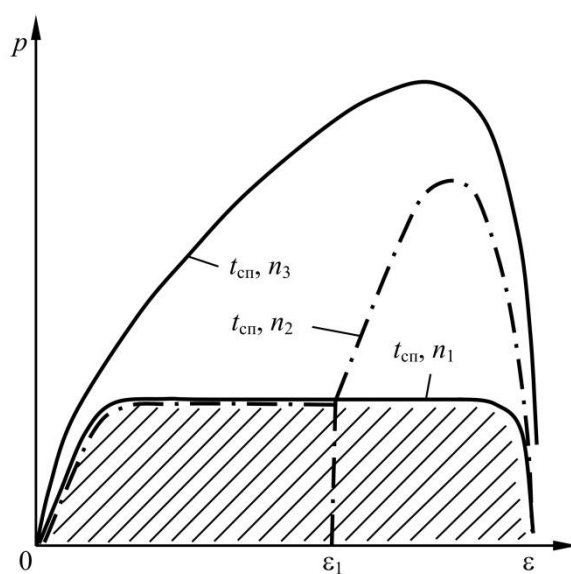


Рисунок 2 – Типовая диаграмма прокатки клиньев в состоянии сверхпластичности и вне его

при прокатке клиновых образцов в изотермических условиях в температурном интервале $t_{сп}$, соответствующем сверхпластичности, при разных скоростях деформирования. При оптимальных параметрах $t_{сп}, n_1$ сверхпластическая прокатка происходит во всем диапазоне обжатий. При увеличении частоты вращения валков и соответственного роста с увеличением степени обжатия скорости деформации (кривая $t_{сп}, n_2$) сверхпластическая деформация возможна только в интервале обжатий от 0 до ϵ_1 .

При более высоких скоростях деформирования ($t_{сп}, n_3$), когда скорость деформации $\dot{\epsilon}$ во всем диапазоне обжатий превышает максимальную скорость сверхпластического течения $\dot{\epsilon}_{сп}$, протекает обычный процесс деформации. Следовательно, область сверхпластической прокатки определяется количественно определенными значениями основных параметров процесса. Для нахождения температурного интервала сверхпластичности прокатку клиновых образцов осуществляют при варьировании значений обоих параметров t и n с построением аналогичных графиков $p = f(t, n, \epsilon)$ и определением области сверхпластичности, ограниченной кривой, параллельной горизонтальной оси.

В работе [16] при исследовании процесса сверхпластической прокатки стали 12ХНМФА, имеющей различный размер зерна в исходной

структуре, на низкоскоростном стане продольной прокатки ($n \cong 1 \text{ мин}^{-1}$) экспериментально получены аналогичные зависимости. С ростом исходного зерна сужается область обжатий, соответствующих сверхпластичности, при превращении ультрамелкозернистой структуры в крупнозернистую процесс переходит в область обычной (не сверхпластической) деформации, что аналогично отсутствию оптимизации по скорости или температуре.

Предложенным в настоящей работе методом можно определять температурно-скоростные и деформационные параметры сверхпластической деформации металлов и сплавов на основании имитирующего реальные схемы объемного напряженного состояния при основных процессах обработки металлов давлением способа испытаний. Таким способом является горячая прокатка клиновых образцов на гладкой бочке с уширением или без него (в зависимости от соотношения максимальной высоты и ширины исходного образца). С целью большего приближения к процессам сортовой прокатки или объемной штамповки в закрытых штампах можно рекомендовать прокатку клиновых образцов в калибрах разного сечения.

Выбор размеров клиновых образцов осуществляется в зависимости от имеющихся условий и наличия лабораторного оборудования. В наших опытах использовали клиновые образцы размерами $(5-25) \times 20 \times 100$ мм [15] применительно к лабораторным станам типа дуо 230-250. Для

обеспечения постоянной температуры деформации при прокатке клинового образца во времени могут использоваться различные способы изотермирования очага деформации: подогрев валков, применение защитных покрытий типа эмалей ЭВТ, а также теплоизолирующих прокладок (асбест, муллитокремнеземный войлок МКРВ-200 и др.). Эти способы могут применяться как в отдельности, так и в различном сочетании. Надежность обеспечения изотермических условий необходимо предварительно проверять путем снятия диаграммы температура – время при прокатке контрольных клиновых образцов с зачеканенными по длине термопарами. Компенсация потерь температуры при переносе образца из нагревательного устройства к стану может быть достигнута путем соответствующего повышения температуры нагрева. Особый интерес представляет использование при испытаниях прокатные установки, работающие по методу «электростимулированной прокатки» [17, 18].

Для определения температурно-скоростного интервала сверхпластической деформации клинья прокатывают при температурах не ниже температуры рекристаллизации и различных скоростях деформирования с построением сводной диаграммы (рисунки 1 и 2), которая позволит установить количественные значения параметров сверхпластической деформации: температуру, степень обжатия и скорость вращения валков (скорость деформирования).

В случае необходимости использования полученных результатов применительно к процессам объемной штамповки скорость деформирования (n , мин⁻¹) легко пересчитать на линейные величины (например, V , мм/мин). Из прокатанных клиновых образцов после обмеров изготавливают продольные и поперечные шлифы для проведения металлографических исследований структуры и размера зерна. Изготовление шлифов по всей длине прокатанного образца позволяет установить трансформацию структуры металла в исследованном интервале значений температур, скоростей и деформаций. Степень деформации образцов, рекомендованных нами размеров, находится в интервале значений от 0 до 80 %, охватывающем весь диапазон величин, имеющих место в практике. Наибольшую информацию о структуре, естественно, дают продольные шлифы.

С помощью методов определения микротвердости можно предварительно оценить механические свойства прокатанного металла. Для фиксации структуры образцы после прокатки

можно охлаждать в воде. Для сравнения и учета реальных условий второй образец, прокатанный при тех же параметрах, охлаждается на воздухе. Предложенная методика проста, надежна, не требует изготовления сложных образцов. Выполнение экспериментов доступно любой лаборатории, оснащенной станом горячей прокатки с регулируемой частотой вращения валков, тензометрической станцией и нагревательными устройствами.

Таким образом, предложенная методика экспериментального определения температурно-скоростных и деформационных параметров сверхпластической деформации металлических материалов основана на имитации фактической схемы объемно-деформированного состояния металла, характерной для реальных процессов обработки металлов давлением.

Методика не требует сложных образцов и специализированного оборудования и доступна любой заводской и научно-исследовательской лаборатории, оснащенной лабораторным станом продольной прокатки. Она не претендует на универсальность и в комплексе с существующими способами оценки параметров сверхпластической деформации может способствовать прогрессу в промышленном применении этого высокоэффективного процесса.

Литература

1. *Грабский М.В.* Структура и сверхпластичность металла / М.В. Грабский. М.: Металлургия, 1975.
2. *Кайбышев О.А.* Сверхпластичность промышленных сплавов / О.А. Кайбышев. М.: Металлургия, 1984.
3. *Новиков И.И.* Сверхпластичность сплавов с ультрамелким зерном / И.И. Новиков. М.: Металлургия, 1984.
4. *Кайбышев О.А.* Сверхпластичность керамического соединения $Ba_2Cu_3O_{7-x}$ / О.А. Кайбышев // ДАН СССР. 1989. Т. 305. № 5. С. 1120–1123.
5. *Кунеев В.И.* Сверхпластичность некоторых материалов при сжатии / В.И. Кунеев, Я.И. Рудаев, А.Г. Попов, Н.В. Жданов // Журнал прикладной механики и технической физики. 1976. № 3. С. 140–143.
6. *Суровцев А.П.* О сверхпластичности коррозионно-стойких хромоникелевых сталей ферритно-аустенитного класса / А.П. Суровцев, А.Е. Суханов // Металловедение и термическая обработка металлов. 1988. № 7. С. 32–39.

7. Чашников Д.И. Деформируемость судостроительных сталей при обработке давлением / Д.И. Чашников. Л.: Судостроение, 1974.
8. Смирнов О.М. Обработка металлов давлением в состоянии сверхпластичности / О.М. Смирнов. М.: Машиностроение, 1979.
9. Кайбышев О.А. Перспективы промышленного использования обработки материалов в сверхпластическом состоянии / О.А. Кайбышев // Кузнечно-штамповочное производство. 1986. № 8. С. 4–6.
10. Грешнов В.М. Влияние схемы деформации на механические свойства и структуру сверхпластичных сплавов Zn + 22 % Al и ВТ9 / В.М. Грешнов // Изв. АН СССР. Металлы. 1983. № 6. С. 158–162.
11. Franklin I.E. On the effects of hydrostatic pressure on mechanical of 7475 aluminium alloy / I.E. Franklin, I. Mukhopadhyay, Mukherjee // Scripta Metallurgica. 1988. Vol. 22. P. 865–870.
12. Чумаченко Е.Н. Проектирование оптимальных технологических режимов в условиях сверхпластичности / Е.Н. Чумаченко, Л.Т. Макарова, Г.А. Кривонос, В.К. Щеринов // Кузнечно-штамповочное производство. 1989. № 2. С. 3–7.
13. Панченко Е.В. Экспериментальное определение параметров m и K механического уравнения состояния материалов при пневмоформовке в режиме сверхпластичности / Е.В. Панченко // Исследования в области пластичности и обработки металлов давлением. Тула: Тульск. политехн. ин-т, 1977. С. 121–131.
14. Чижиков Ю.М. Теория подобия и моделирования процессов обработки металлов давлением / Ю.М. Чижиков. М.: Metallurgia, 1970.
15. Киселев Л.Е. Геометрические и кинематические параметры очага деформации при продольной прокатке клинового образца на гладкой бочке / Л.Е. Киселев, В.И. Криворотов, Д.И. Чашников // Судостроительная промышленность. Сер. Материаловедение: Металловедение. Metallurgia. 1989. Вып. 11. С. 75–79.
16. Киселев Л.Е. Исследование процесса продольной прокатки стали 12ХНЗМФА в режиме сверхпластичности / Л.Е. Киселев, В.И. Криворотов, Д.И. Чашников // Судостроительная промышленность. Сер. Материаловедение. Металловедение. Metallurgia. 1989. Вып. 11. С. 70–74.
17. Новиков И.К. Расчет температуры при электростимулированной прокатке тонких лент / И.К. Новиков, К.М. Климов, Ю.С. Бурханов // Изв. АН СССР. Металлы. 1986. № 2.
18. Троцкий О.А. Электропластическая деформация вольфрама / О.А. Троцкий // ДАН СССР. 1987. Т. 295. № 5. С. 1114–1118.