

Оценка деформируемости титанового сплава в условиях изотермического формообразования

Т. Р. Гараненко • А. В. Титов

Механико-машиностроительный институт, КПИ им. Игоря Сикорского, г. Киев, Украина

Received: 15 April 2020 / Accepted: 25 May 2020

Аннотация. Разработан и обоснован метод оценки деформируемости металлов и сплавов в условиях изотермического формообразования на основании испытаний на двухосное растяжение при формообразовании мембран. Выполнена техническая реализация метода.

Разработана установка для формообразования мембран давлением газовой среды - газа аргона из листового материала в изотермических условиях при температурах горячей пластической деформации.

Результаты исследований листовых заготовок из титанового сплава OT4-0 при температуре позволили установить зависимость предельной величины деформаций от температуры деформирования в интервале 820–850 С.

Показано, что результаты полученных предельных деформаций могут быть использованы в критерии Normalized Cockcroft-Latham при проведении численных расчетов пластического формообразования в изотермических условиях.

Ключевые слова: метод оценки деформируемости сплавов, изотермическое пластическое формообразование, титановый сплав OT4-0, критерии Normalized Cockcroft-Latham.

Введение

Предельное значение деформируемости металлов и сплавов определяет возможность формообразования деталей и конструкций методами пластических деформаций без разрушения. В работах [1–8] рассмотрены и систематизированы модели разрушения, среди которых наибольшее распространение получили критерии разрушения, которые используются в программных комплексах расчета технологических процессов пластического формообразования методом конечных элементов.

При моделировании в специализированном программном комплексе Deform 3D возможно использование ряда критериев разрушения (Cockcroft-Latham, Brozzo, Ayada и других). Наиболее часто используют классический критерий Cockcroft-Latham, который основан на энергетических принципах разрушения – предельном значении удельной работы деформации:

$$\int_0^{\bar{e}_p} \sigma_1 de_p \leq c, \quad (1)$$

где de_p – приращение накопленной пластической деформации, σ_1 – максимальное главное напряжение ($\sigma_1 > 0$ – растягивающее напряжение), c – предельное значение удельной работы (энергии деформации) максимального растягивающего (главного) напряжения.

Энергетические критерии позволяют достаточно точно оценивать вероятность разрушения твердых сплошных тел при монотонных процессах пластического деформирования с относительно сложной траекторией деформации.

✉ Т. Р. Гараненко
tetiana.garanenko@gmail.com

✉ А. В. Титов
acy_m@yahoo.com

Повышение сложности траектории деформаций возможно при переходе от рассмотрения деформаций к рассмотрению скоростей деформаций, тогда соотношение (1) будет иметь следующий вид:

$$\int_t \sigma_1 \varepsilon_i de_p \leq c \quad (2)$$

где ε_i – интенсивность скоростей деформаций, t – параметр времени.

Использование критериев позволяет определить момент разрушения материала заготовки. Разрушение материала деформируемой заготовки наступает при достижении величины удельной работы деформирования определенного предельного значения c_{kp} , которое определяется экспериментально:

$$c_p = c_{kp} \quad (3)$$

Величина предельного значения критерия, как правило, определяется экспериментально и может изменяться в широком диапазоне в зависимости от схемы напряженного состояния, условий деформирования и вида материала.

Для учета влияния компонент тензора напряжений в дальнейшем критерий (1) был модифицирован путем введения относительной величины – отношения максимального главного напряжения к интенсивности напряжений (величины, пропорциональной второму инварианту тензора напряжений). Это позволило преобразовать критерий Cockcroft-Latham из энергетического в деформационный:

$$\int_0^{e_p} \frac{\sigma_1}{\sigma_i} de_p < e_{fs}, \quad (4)$$

где e_{fs} – предельное значение накопленной пластической деформации.

Этот критерий разрушения получил название Normalized Cockcroft-Latham. В таком виде он использован в программном комплексе Deform 3D.

Особенностью определения величины предельной накопленной пластической деформации e_{fs} является учет показателя жесткости схемы напряженного состояния, как это сделано в нормализованном критерии разрушения Кокрофта-Летема-Оха [6–8] для интервала $-1 \leq \eta \leq 2$:

$$\bar{e}_{fs}(\eta) = \frac{\bar{e}_{fs}(2)}{(\eta + 2 \cdot \cos[\frac{1}{3} \cdot \arccos(0,5 \cdot \eta \cdot (3 - \eta^2))])}, \quad (5)$$

где $\eta = \frac{3\sigma}{\sigma_n}$ – показатель жесткости схемы напряженного состояния;

$\bar{e}_{fs}(2)$ – предельное значение накопленной пластической деформации для двухосного растяжения.

Ограничивающей в этом соотношении является величина предельной накопленной деформации e_{fs} для двухосного растяжения (при $\eta = 2$).

Поэтому актуальным является разработка экспериментальной методики определения предельной величины накопленной деформации при двухосном растяжении в изотермических условиях формообразования для оценки деформируемости титановых сплавов.

Цель исследования

Оценка деформируемости титанового сплава в условиях изотермического формообразования на основе определения предельного значения величины деформаций при двухосном растяжении.

Методика исследований

Для определения предельного значения деформаций титанового сплава в условиях двухосного растяжения использован экспериментальный метод пластического формообразования круглой в плане мембраны из листового материала под действием внутреннего давления [9–12].

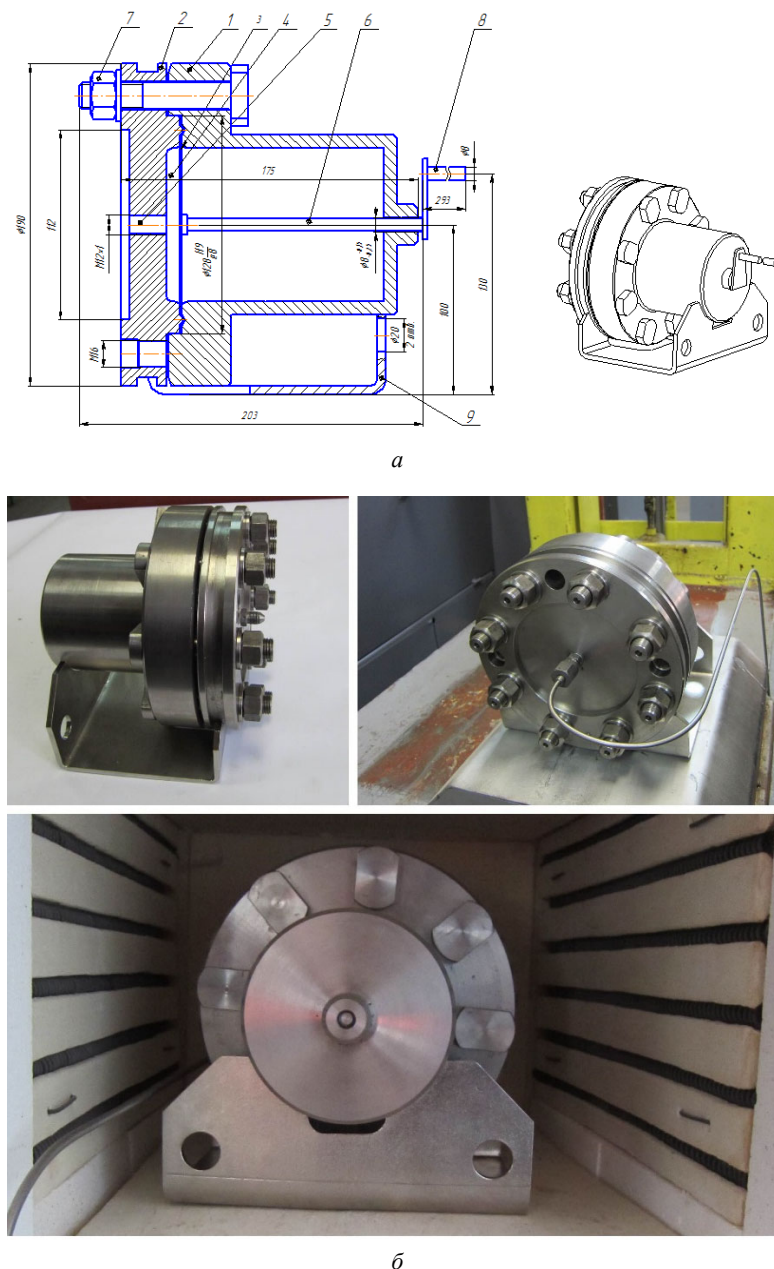


Рис. 1. Установка для исследований деформирования мембраны: а – схема, б – общий вид

металлических листовых материалов в изотермических условиях разработана установка, которая показана на рис. 1. Установка (рис. 1, а) имеет корпус 1 и замыкающую крышку 2, между которыми устанавливается мембрана 3 из листового металла. В рабочую полость 4 подается через отверстие 5 газ (аргон) под заданным давлением q . Под действием давления газовой среды мембрана деформируется и прогиб мембраны (высота купола) замеряется перемещением системы штоков 6 и 8. Крепление корпуса с крышкой осуществляется болтами с гайками 7. Корпус устанавливается на приспособление 9.

На рис. 1, б показана установка размещенная в камере нагревательного устройства – печи СНОЛ 30/1300.

Схема нагружения листовой заготовки в рабочей камере 4 установки газовой средой (аргон) с давлением q показана на рис. 2. В процессе изотермического формообразования измеряется высота купола мембраны H системой штоков 6 и 8.

В процессе формообразования мембраны наблюдается устойчивое монотонное растяжение листового металла, которое позволяет получить достаточно полную оценку механических свойств при больших пластических деформациях [13, 14].

В произвольной точке купола мембраны растягивающие напряжения в плоскости листа находятся в соотношении $\sigma_1 \neq \sigma_2$. В центре купола мембраны (на оси симметрии) $\sigma_1 = \sigma_2$.

При этом деформированное состояние материала стенки мембраны является объемным. В произвольной точке купола мембраны выполняется соотношение между главными деформациями $e_1 + e_2 = e_3$. При этом e_3 – главная деформация, которая характеризует утонение стенки. В центре купола мембраны $e_1 = e_2$, а деформация $e_3 = \max$ и численно равна интенсивности деформаций.

Величина деформации утонения изменяется вдоль образующей купола мембраны от нуля ($e_3 = 0$) в месте защемления фланца, до максимального значения на оси симметрии купола.

Поэтому на оси симметрии купола мембраны действуют максимальные деформации и напряжения растяжения. Это приводит к тому, что разрушение мембраны происходит в центре [12].

Эти предпосылки положены в основу метода определения предельного значения деформаций при испытании листового металла в процессе изотермического формообразования мембран. Таким образом величина предельной деформации e_{fs} в зависимости (5) численно равна величине деформации утонения e_3 в центре купола мембраны в момент её разрушения.

Для проведения испытаний

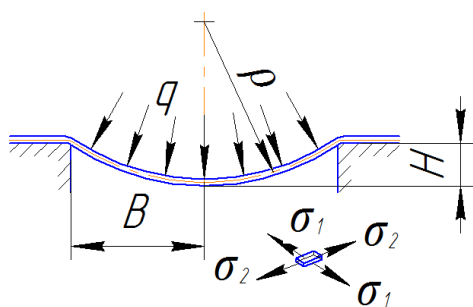


Рис. 2. Схема нагружения мембраны

Исследования проводились для листового титанового сплава ОТ4-0 толщиной 0,5 мм и средней величиной зерна 9–10 мкм.

Схема системы реализации процесса формообразования мембраны из листовых заготовок в изотермических условиях представлена на рис. 3.

Установка для формообразования мембраны размещается в рабочей зоне нагревательного оборудования, где создается и контролируется заданная температура формообразования мембраны. Давление в рабочей зоне установки, необходимое для формообразования мембраны, регулируется системой манометр-редуктор. Для формообразования использован инертный газ – аргон, который создает необходимое давление и защищает заготовку из титанового сплава от взаимодействия с воздухом.

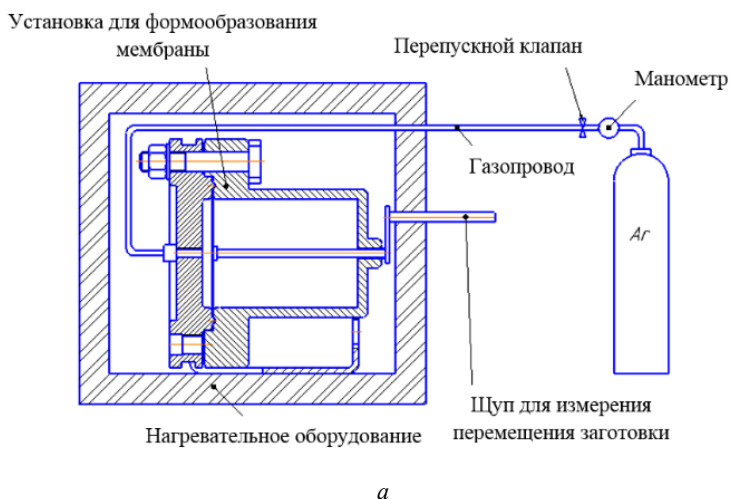


Рис. 3. Реализация процесса формообразования мембраны: а – схема, б – оборудование для реализации

Основные результаты исследования

Формообразование образцов из титанового сплава ОТ4-0 проводилось в изотермических условиях в диапазоне температур 820–850 °С с шагом 10 °С, а изменение давления аргона в пределах 0,01 до 0,5 МПа (рис. 4). Для разогрева заготовки проводили выдержку в печи от 25 до 45 мин. Глубина мембраны во времени определялась по перемещению штоков 6 и 8 (рис. 1). В течение эксперимента, через каждую минуту фиксировали глубину мембраны. На основе данных были построены зависимости глубины формообразования мембраны от времени и температуры.

Глубина мембраны под действием постоянного давления газовой среды растет (рис. 5, а) во времени. На кривой формообразования мембраны можно выделить три этапа. На первом этапе формообразования характерна интенсивная смена глубины мембраны от времени. На втором этапе формообразования скорость изменения глубины постоянна – зона устойчивого процесса. На третьем этапе возникает локализация деформации в центральной области купола мембраны. При достижении относительной глубины $H/B \geq 1$ деформация резко возрастает. Вид полученных кривых похож на кривые кратковременной ползучести. При 840 °С и 850 °С кривые глубины от времени более стремительнее идут вверх (рис. 5, а).

Глубина мембраны в диапазоне температур 820 ... 850 °С увеличивалась с 59 до 63,5 мм (рис. 5, б).

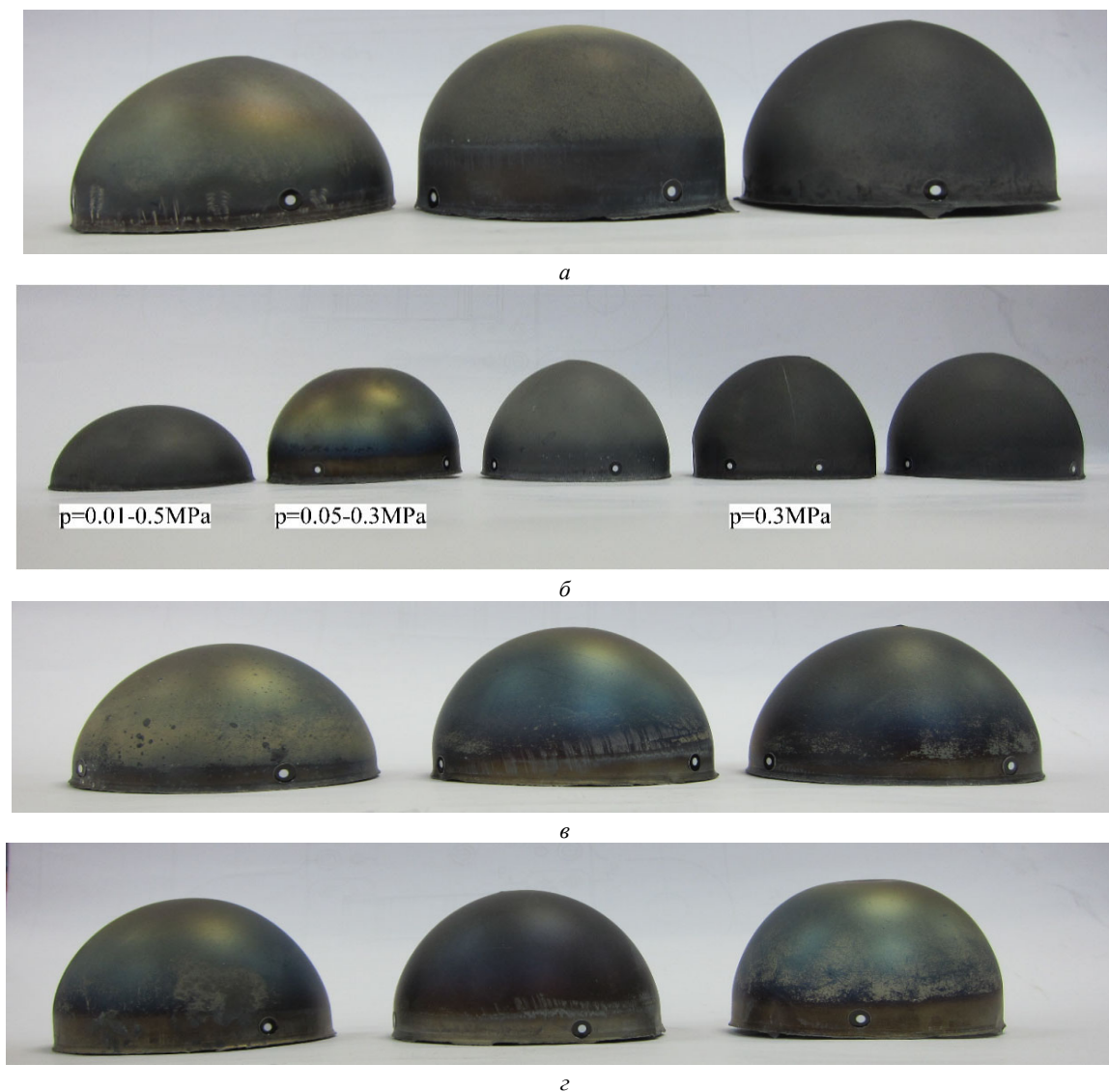


Рис. 4. Форма мембраны в зависимости от технологических параметров для титанового сплава ОТ4-0: а – $T = 820^\circ$; $p = 0.3 \text{ MPa}$; б – $T = 830^\circ$, в – $T = 840^\circ$; $p = 0.3 \text{ MPa}$, г – $T = 850^\circ$; $p = 0.3 \text{ MPa}$

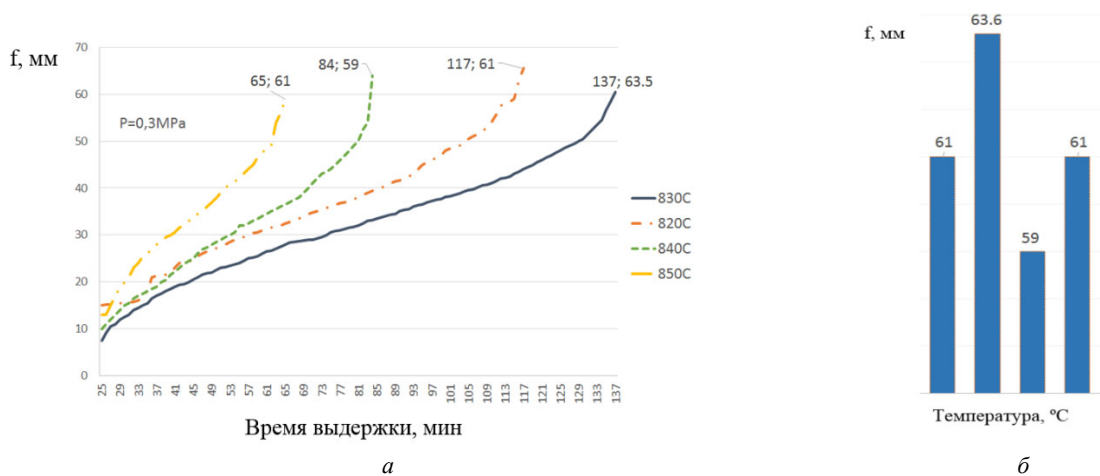


Рис. 5. Зависимость глубины мембраны (f) от времени выдержки заготовки под постоянным давлением при различных температурах деформирования (а) и максимальная глубина формообразования мембраны в зависимости от температуры (б)

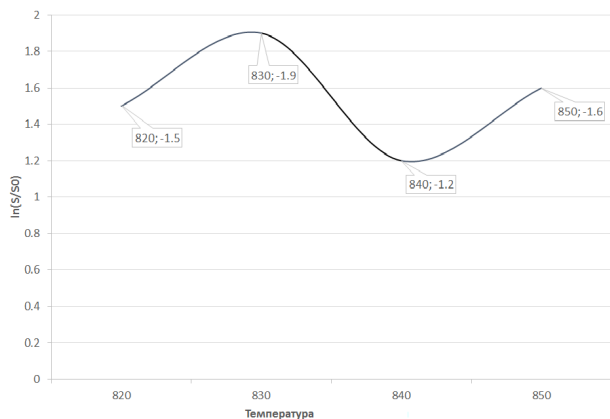


Рис. 6. Максимальные деформации в момент разрушения мембраны в зависимости от температуры

Установлено, что разрушение возникает в месте максимальных деформаций – в центре мембраны. На рис. 6 показана зависимость максимальной деформации утонения в момент разрушения от температуры изотермического формообразования при постоянном давлении. Результаты получены для температур 820 °С, 830 °С, 840 °С, 850 °С на основе экспериментальных исследований не менее чем для пяти образцов.

Анализ результатов показал, что в интервале температур полиморфных преобразований титанового сплава ОТ4-0 максимальные деформации в момент разрушения в центре при температуре 830 °С равны 1,9. При температуре 840 °С – наименьшая глубина формообразования, а максимальные деформации в центре мембраны составляют 1,2. При температуре 820 °С и 850 °С глубина формообразования и максимальные деформации в центре мембраны одинаковы.

Микроструктура мембран после формообразования не значительно отличается от исходной: есть зерна α -фазы с небольшим количеством β -фазы – характерной для сплава ОТ4-0, отожженного при температурах $\alpha + \beta$ -области. Размеры микрозерен во всех образцах находятся в пределах 10 – 12 мкм. На поверхности всех образцов обнаружено альфирированный слой глубиной 2 – 7 мкм.

Выводы

Экспериментально полученная зависимость (рис. 6) определяет величину предельной деформации e_{fs} в зависимости от температуры изотермического деформирования. Как показывает анализ результатов эта величина не постоянна в рассматриваемом интервале температур. Максимальная деформируемость титанового сплава ОТ4-1 наблюдается в интервале 820 – 830 °С, она составляет 1,5 – 1,9. Эти значения могут быть использованы при численных расчетах в критерии Normalized Cockcroft-Latham.

References

1. Барышников М.П. К вопросу выбора критериев разрушения при математическом моделировании процессов обработки давлением в современных программных комплексах / М.П. Барышников, М.В. Чукин, А.Б. Бойко, Н.Н. Ильина // Обработка сплошных и слоистых материалов. – 2014. – Т. 40, № 1. – С. 48–55.
2. Барышников М.П. Анализ программных комплексов для расчета напряженно-деформированного состояния композиционных материалов в процессах обработки давлением // М.П. Барышников, М.В. Чукин, А.Б. Бойко // Вестник магнитогорского ГТУ им. Г.Ц. Носова. – 2012. – № 4. – С. 72–74.
3. Долгий Д.К. Моделирование процесса стабилизации высокопрочной холоднодеформированной арматуры / Д.К. Долгий, А.Г. Корчунов, М.П. Барышников // Вестник магнитогорского ГТУ им. Г.Ц. Носова. – 2012. – № 2. – С. 43–47.
4. Guntram R. Modeling ductile damage of a Ni-base alloy considering the microstructure evolution during hot working // Steel Grips/ Journal of steel and Related Materials. – 2006. – № 4. – P. 56–63.
5. Орлюк М.В. Граничні значення критеріїв руйнування при моделюванні процесів витягування в середовищі DEFORM / Обработка материалов давлением – Краматорск. – 2017. Т. 45, № 2. – С. 22–29. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/27990>
6. Bao Y.A. Comparative study on various ductile crack formation criteria / Y. Bao, T. Wierzbicki // J Eng Mater Technol. – 2004. – No. 126. – P. 314–324
7. Bao Y.A. On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space/ Y. Bao, T. Wierzbicki //International Journal of Mechanical Sciences. – 2004. – Vol. 46, No. 1. P. 81–98.
8. Михалевич В. М. Порівняльне дослідження моделей граничних пластичних деформацій [Текст] / В.М. Михалевич, Ю.В. Добранюк, В.О. Красвський // Вісник машинобудування та транспорту. – 2018. – № 2. – С. 56–64. http://nbuv.gov.ua/UJRN/vmbt_2018_2_9
9. Томленов А.Д. Теория гидростатического испытания листового металла – Вестник машиностроения. – 1958. – № 10. – С. 47–49.
10. Hill R. Theory of the Plastic Bulging of the Metal Diaphragm by Lateral Pressure – Philosophical Magazine. – 1950. – Vol. 41, P. 1133–1144.
11. Исаченков Е.И. Штамповка резиной и жидкостью. – М.: Машиностроение, 1967. – 367 с.
12. Смирнов-Аляев, Г.А. Экспериментальное исследование в обработке металлов давлением / Г.А. Смирнов-Аляев. – М.: Машиностроение, 1972. – 360 с.
13. Колесников, А.В. Определение показателей сверхпластичности титанового сплава ОТ4-1 / А.В. Колесников, А.А. Чеславская, А.К. Шмаков // Вестник ИрГТУ. – 2015. – Т. 105, № 10. – С. 57–61.
14. Шоршоров, М.Х. Сверхпластичность металлических материалов / М.Х. Шоршоров. – М.: Наука, 1973. – 219 с.

Evaluation of the deformability of a titanium alloy in isothermal forming

T. R. Garanenko, A. V. Titov

Abstract. A method for assessing the deformability of metals and alloys under isothermal shaping based on biaxial tensile tests during membrane shaping has been developed and justified. The technical implementation of the method is completed.

An installation for the forming of membranes by pressure of a gaseous medium – argon gas from a sheet material in isothermal conditions at hot plastic deformation temperatures was developed.

The results of studies of sheet blanks from OT4-0 titanium alloy at temperature made it possible to establish the dependence of the limiting strain on the strain temperature in the range of 820–850 °C.

It is shown that the results of the obtained ultimate strains can be used in the Normalized Cockcroft-Latham criterion for numerical calculations of plastic shaping in isothermal conditions.

Keywords: method for assessing the deformability of alloys, isothermal plastic forming, OT4-0 titanium alloy, Normalized Cockcroft-Latham criteria.

Оцінка деформуємості титанового сплаву в умовах ізотермічного формоутворення

Т. Р. Гараненко, А. В. Тітов

Анотація. Розроблено та обґрунтовано метод оцінки деформівності металів і сплавів в умовах ізотермічного формоутворення на основі випробувань на двовісне розтягнення при формоутворенні мембран. Виконана технічна реалізація методу.

Розроблено установку для формоутворення мембран тиском газового середовища - газу аргону з листового матеріалу в ізотермічних умовах при температурах гарячої пластичної деформації.

Результати досліджень листових заготовок з титанового сплаву OT4-0 при температурі дозволили встановити залежність граничної величини деформації від температури деформування в інтервалі 820–850 °C.

Показано, що результати отриманих граничних деформацій можуть бути використані в критерії Normalized Cockcroft-Latham при проведенні чисельних розрахунків пластичного формоутворення в ізотермічних умовах.

Ключові слова: метод оцінки деформівності сплавів, ізотермічне пластичне формоутворення, титановий сплав OT4-0, критерії Normalized Cockcroft-Latham.

References

1. Baryshnikov, M.P., Chukin, M.V., Boiko, A.B. and Il'ina, N.N. (2014), "K voprosu vybora kriteriev razrusheniya pri matematicheskom modelirovanii protsessov obrabotki davleniem v sovremennykh programmnykh kompleksakh", *Obrabotka sploshnykh i sloistykh materialov*, vol. 40, no.1, pp. 48–55.
2. Baryshnikov, M.P., Chukin, M.V. and Boiko, A.B. (2012), "Analiz programmnykh kompleksov dlya rascheta napryazhenno-deformirovanogo sostoyaniya kompozitsionnykh materialov v protsessakh obrabotki davleniem", *Vestnik magnitogorskogo GTU im. G.Ts. Nosova*, no. 4, pp. 72–74.
3. Dolgii, D.K., Korchunov, A.G. and Baryshnikov, M.P. (2012), "Modelirovanie protsessa stabilizatsii vysokoprochnoi kholodnodeformirovannoi armatury", *Vestnik magnitogorskogo GTU im. G.Ts. Nosova*, no. 2, pp. 43–47.
4. Guntram, R. (2006), "Modeling ductile damage of a Ni-base alloy considering the microstructure evolution during hot working". *Steel Grips, Journal of steel and Related Materials*, no. 4, pp. 56–63.
5. Orlyuk, M.V. (2017), "Granichni znachennya kriteriiv ruinuвання pri modelyuvanni protsesiv vityaguvannya v seredovishchi DEFORM", *Obrabotka materialov davleniem*, Kramatorsk, vol. 45, no. 2, pp. 22–29. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/27990>
6. Bao, Y.A. and Wierzbicki, T. (2004), "Comparative study on various ductile crack formation criteria", *J Eng Mater Technol.*, no. 126, pp. 314–324.
7. Bao, Y.A. and Wierzbicki, T. (2004), "On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space", *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 46, no. 1, pp. 81–98.
8. Mikhalevich, V.M., Dobranyuk, Yu.V. and Kraevskii, V.O. (2018), "Porivnyal'ne doslidzhennya modelei granichnikh plastichnikh deformatsii", [Tekst], *Visnik mashinobuduvannya ta transport*, no. 2, pp. 56–64. http://nbuv.gov.ua/UJRN/vmbt_2018_2_9
9. Tomlenov, A.D. (1958), "Teoriya gidrostaticheskogo ispytaniya listovogo metalla", *Vestnik mashinostroeniya*, no. 10, pp. 47–49.
10. Hill, R. (1950), "Theory of the Plastic Bulging of the Metal Diaphragm by Lateral Pressure", *Philosophical Magazine*, vol. 41, pp. 1133–1144.
11. Isachenkov, E.I. (1967), *Shtampovka rezinoy i zhidkost'yu* [Rubber and liquid stamping], Mashinostroenie, Moscow, Russia.
12. Smirnov-Alyayev, G.A. (1972), *Eksperimental'noe issledovanie v obrabotke metallov davleniem* [Experimental research in metal forming], Mashinostroenie, Moscow, Russia.
13. Kolesnikov, A.V. A.A. Cheslavskaya, A.K. Shmakov (2015), "Opredelenie pokazatelei sverkhplastichnosti titanovogo splava OT4-1", *Vestnik IrGTU*, vol. 105, no. 10, pp. 57–61.
14. Shorshorov, M.Kh. (1973), *Sverkhplastichnost' metallicheskih materialov* [Superplasticity of metallic materials], Nauka, Moscow, Russia.