

РАЗДЕЛ II ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621.7.011

Алимов А. И.
Власов А. В.
Евсюков С. А.

ВЛИЯНИЕ ТРЕНИЯ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ТЕКУЧЕСТИ ПРИ ПОСТРОЕНИИ КРИВЫХ УПРОЧНЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ИСПЫТАНИЙ НА ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ

В связи с повсеместным внедрением анализа процессов деформирования методом конечных элементов актуальной становится задача построения кривой упрочнения материалов для широкого диапазона истинных степеней деформации, скоростей деформации и температур.

Испытание на растяжение при температуре $20 \pm 15^\circ \text{C}$ в области равномерного удлинения (в диапазоне истинных степеней деформации до 0,2–0,3) позволяет очень просто построить кривые упрочнения, так как при одноосном напряженном состоянии максимальное главное напряжение равно напряжению текучести:

$$\sigma_s = \sigma_1 = \frac{P_i}{F_i} = \frac{P_i}{F_0} \cdot \frac{l_0 + \Delta l}{l_0}.$$

Определение напряжения текучести после образования шейки требует коррекции, т. к. напряженное состояние становится объемным. Один из вариантов коррекции предложил Бриджмен [1], в практике расчетов отечественных ученых используют формулу Давиденкова-Спиридоновой.[2]. Однако все эти формулы основаны на схематизации сложного напряженного состояния в шейке. Кроме того, серьезную сложность представляет собой определение истинной деформации в шейке. Поэтому точность построения кривой упрочнения после образования шейки невелика.

Таким образом, актуальной является задача экспериментального построения кривых упрочнения на основе других опытов, в которых отсутствует локализация очага деформации, либо локализация очага наступает при больших истинных деформациях, по сравнению с одноосным растяжением.

Наибольшую технологическую пластичность (максимальные деформации до разрушения), как показал Бриджмен, материал имеет в том случае, если среднее напряжение в нем минимально. Таким условиям из всех простых опытов в наилучшей степени отвечает испытание на одноосное сжатие. Главным преимуществом испытаний на сжатие является возможность построения кривой упрочнения для более высоких значений истинных деформаций (до 0,8 и более). Обычно для испытаний на сжатие применяют цилиндрические образцы.

Методы испытания на сжатие стандартизированы. ГОСТ 25.503-97 [3] устанавливает методы статических испытаний на сжатие для определения характеристик механических свойств черных и цветных металлов и сплавов. ASTM E9 [4] и ASTM E209 [5] стандартизируют методы испытаний на сжатия металлических материалов при комнатной и повышенных температурах соответственно.

Считается [6], что наибольший вклад в ошибку определения напряжения текучести с помощью испытания на сжатия вносит контактное трение.

Состояние одноосного сжатия достигают путем устранения трения на контактных поверхностях. Полировка торцов образцов и опорных плит и их смазывание позволяет значительно снизить трение на контактных поверхностях, однако, в процессе осадки контактные давление между образцом и плитами становятся высокими и смазка выдавливается, вследствие чего трение опять повышается. Иногда применяют смазанные маслом тефлоновые пленки [7]. Это позволяет значительно снизить трение, однако данный способ нельзя применять для горячих испытаний из-за токсичности тефлона при повышенных температурах.

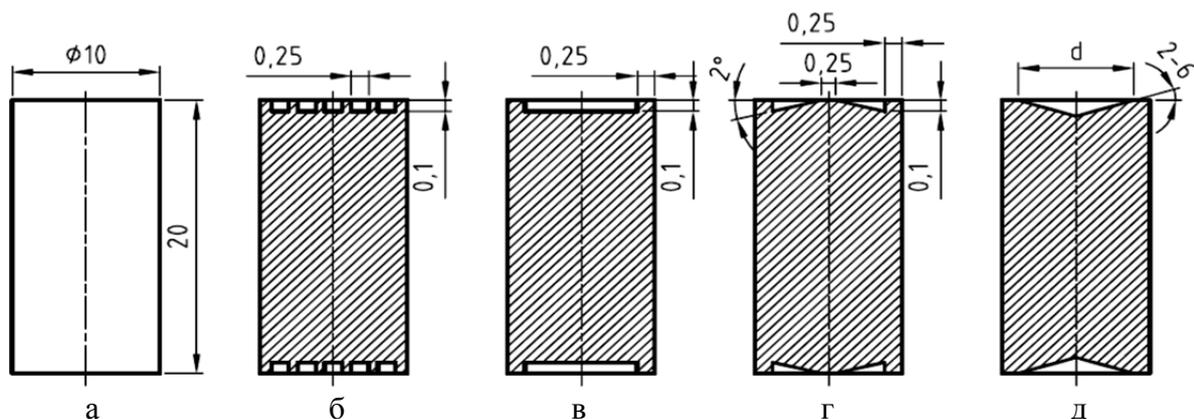


Рис. 1. Геометрия образца для испытания на сжатие:

а – цилиндрический образец; б – образец по Хокету; в – образец по Гербертсу; г – образец по Линтерманс-Фендеру; д – образец по Золотаревскому

Одним из способов удерживания смазки на контактной поверхности является вытачивание (рис. 1) концентрических канавок на торцах образцов [8]. Другой способ был предложен Растегаевым и развит Гербертсом и Вигельсом [9]. С торцов образца удаляют материал, оставляя лишь тонкий опорный пояс. Он удерживает небольшой объем смазки в выемке, создавая гидростатическую подушку с трением, близким к нулю. Подобный образец (но с другими параметрами опорного пояса (высота 0,14...0,93 мм, ширина 0,5...1,2 мм), предлагает для построения кривой текучести с помощью испытания на сжатие ГОСТ 25.503-97 [3]. Данный способ был модифицирован в работе [10] применением конической выемки, что позволило снизить объем удаляемого материала и ошибку измерения деформации. Более того, данная выемка обеспечивает лучшее смазывание опорного пояса, где перемещение материала наибольшее. Исследование показали, что данный резервуар для смазки обеспечивает более высокую точность и воспроизводимость результатов [10]. Золотаревский в своей монографии [11] предлагает для испытаний на одноосное сжатие использовать образцы с конической выемкой.

Целью работы является исследование влияния трения на точность определения истинного напряжения текучести при построении кривых упрочнения с помощью испытания на одноосное сжатие.

Проводились виртуальные эксперименты методом конечных элементов в программном комплексе Defo2m 2D. Принимались следующие допущения:

1. Испытываемый материал рассматривается как жестко-пластическая среда с нелинейным упрочнением. Кривая упрочнения материала (рис. 2) задавалась степенной функцией:

$$\sigma_s = 400 \cdot \varepsilon^{-0.5} + 240.$$

2. Учитывается только изотропное деформационное упрочнение;

3. Материал принимается изотропным, сплошным.

4. Деформирующие плиты жесткие;

Проводилось моделирование испытания на одноосное сжатие цилиндрического образца диаметром 10 мм и высотой 20 мм с фактором трения от 0 до 0,9.

Т. к. образец осесимметричный, а также он симметричен относительно экваториального сечения и условия трения одинаковые на обеих контактных поверхностях, то рассчитывалась четверть его широтного сечения. Сечение разбивалось на 8000 конечных элементов встроенным генератором сетки. На нижней поверхности образца задавалось граничное условие в виде скорости, равной 0. Шаг расчета соответствует перемещению деформирующего инструмента на 0,004 мм. Испытание продолжалось до расчетной истинной деформации 1,609 (2000 шагов).

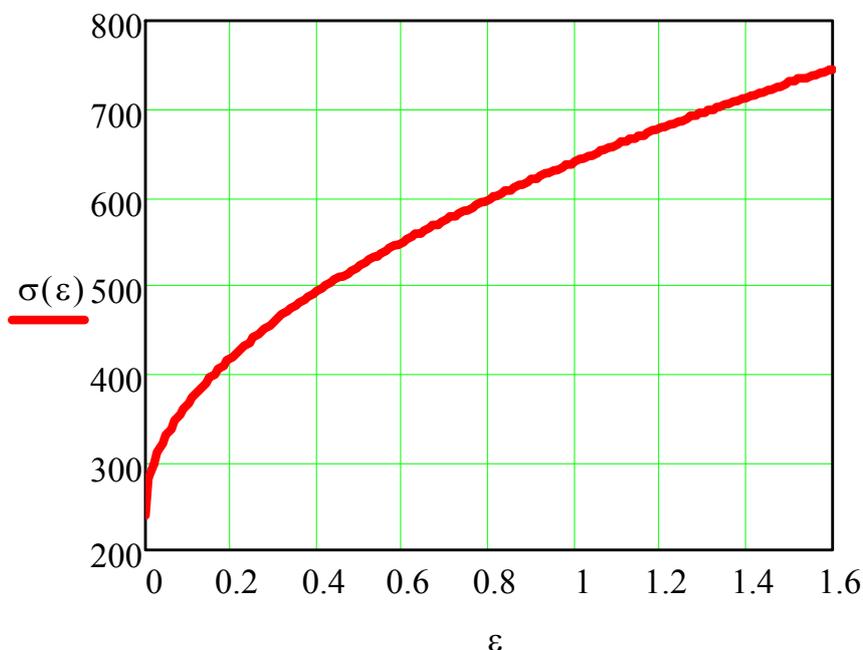


Рис. 2. Заданная кривая упрочнения

Кривую упрочнения строили по следующим формулам:

$$\sigma_s = \frac{P_i}{F_i} = \frac{P_i}{H_0 F_0} (H_0 - S),$$

где S – ход деформирования;

P – сила деформирования;

H_0 – начальная высота образца;

F_0 и F_i – начальная и текущая расчетная площадь сечения образца.

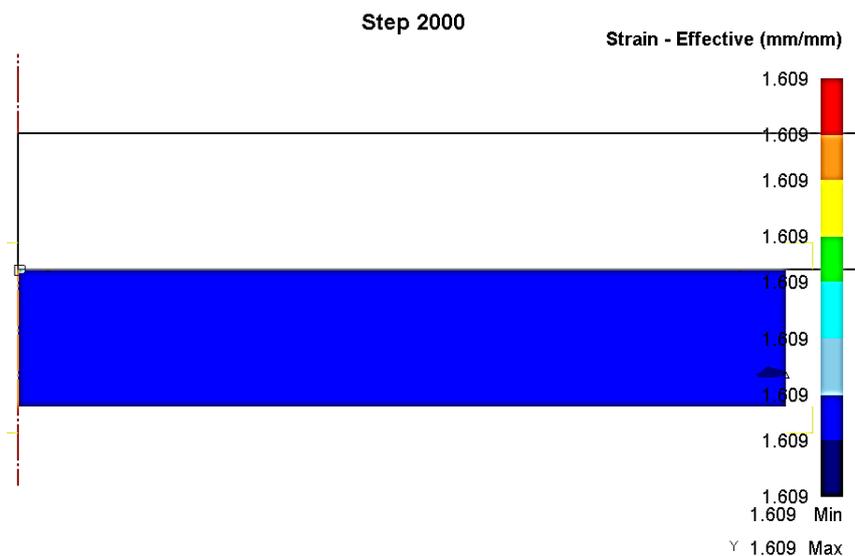
$$\varepsilon = \ln \left(\frac{H_0}{H_0 - S} \right).$$

Рассмотрим каждый из виртуальных экспериментов подробнее.

- Фактор трения $m = 0$

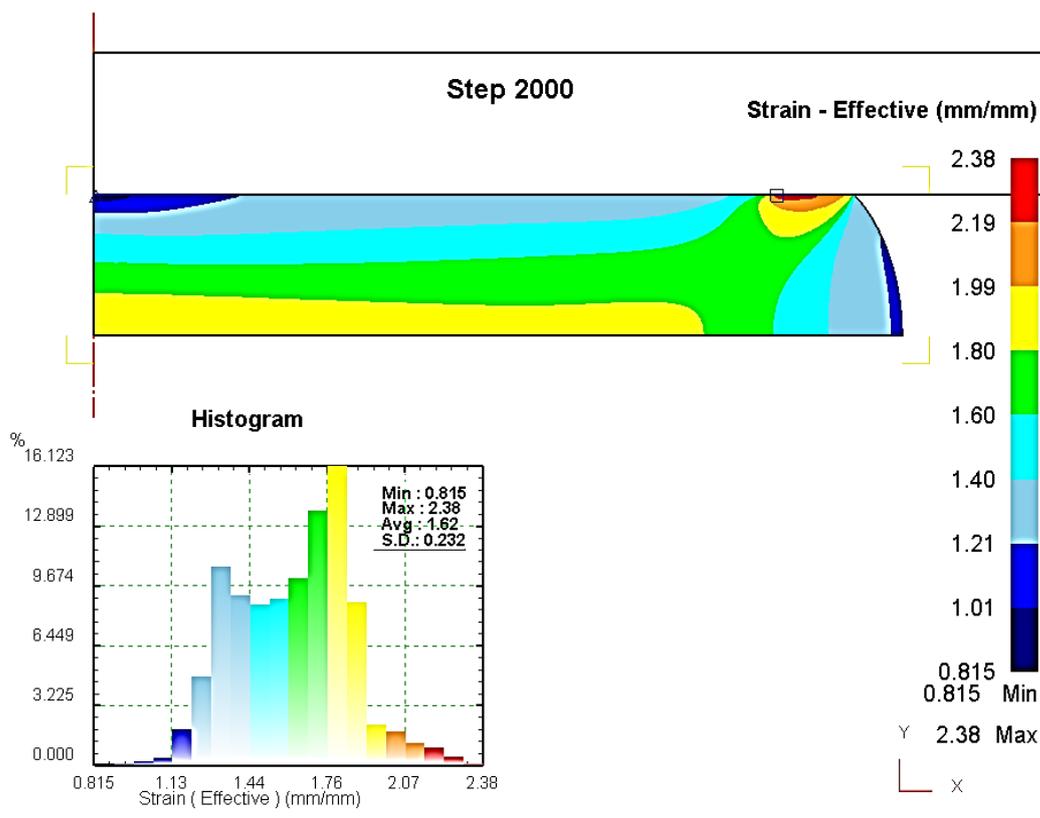
Данный эксперимент моделировался для определения шага, обеспечивающего точность значений накопленных деформаций до третьего знака, а, следовательно, и точность вычисленных значений напряжения текучести. Кроме того, проверялась точность построения кривой текучести при идеальном испытании на одноосное сжатие.

На рис. 3 представлено распределение накопленных деформаций. Видно, что деформация однородная, накопленная степень деформации 1,609. Построенная кривая текучести полностью соответствует заданной, ошибка равна 0 % (см. рис. 7 и 8).

Рис. 3. Распределение накопленных деформаций, $m = 0$

- *Фактор трения $m = 0,1$*

Видно, что трение вносит вклад в деформированное состояние образца. Деформация неоднородна. Гистограмма распределения степени деформации по сечению образца представлена на рис. 4. О степени неоднородности деформации можно судить по стандартному отклонению накопленной деформации, в данном испытании оно равно 0,232.

Рис. 4. Распределение накопленных деформаций, $m = 0,1$

- *Фактор трения $m = 0,5$*

Распределение степени деформации показано на рис. 5. Стандартное отклонение распределения степени деформации равно 0,480.

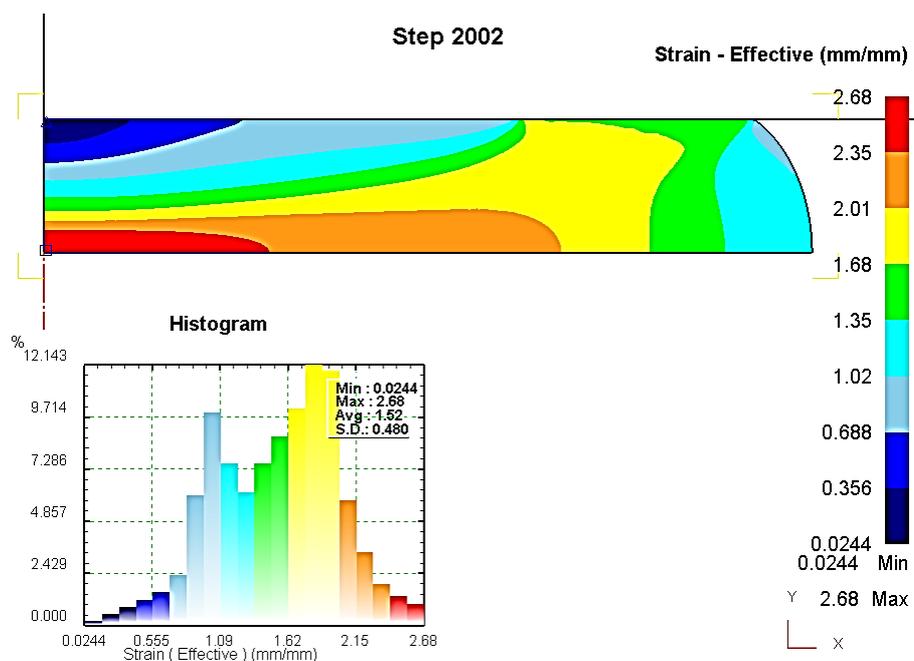


Рис. 5. Распределение накопленных деформаций, $m = 0,5$

- Фактор трения $m = 0,9$

Распределение степени деформации показано на рис. 6. Стандартное отклонение распределения степени деформации равно 0,591.

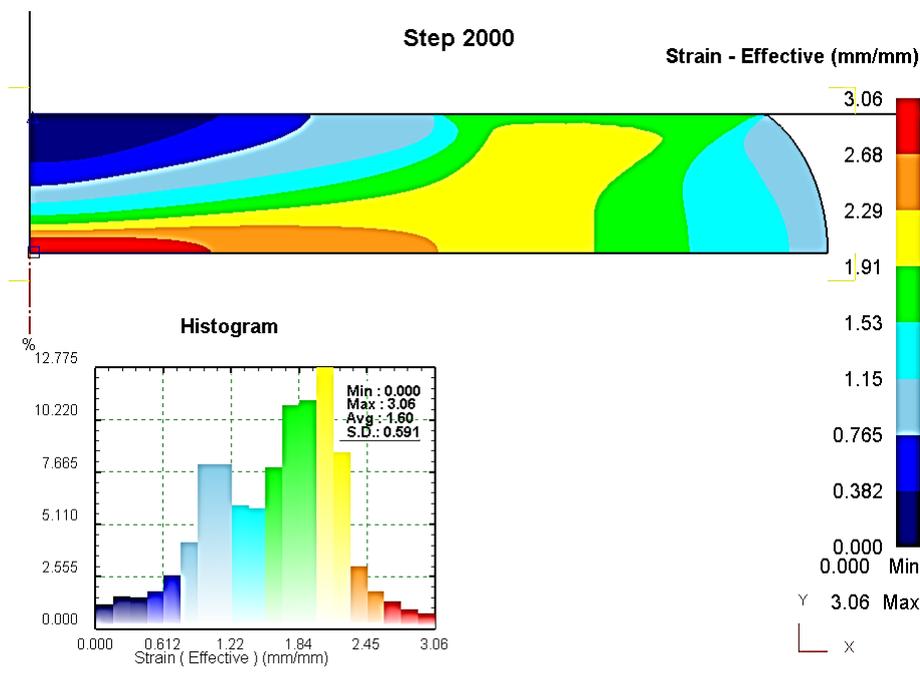


Рис. 6. Распределение накопленных деформаций, $m = 0,9$

Для построения кривых упрочнения используются графики изменения деформирующей силы по ходу деформирования (рис. 7). Анализ графиков показывает, что, несмотря на существенно различные условия трения ($m = 0...0,9$) на значительном промежутке рабочего хода, кривые практически не отличаются друг от друга. Этот вывод позволяет в дальнейшем существенно упростить методику построения кривой упрочнения на интервале деформаций до 0,8

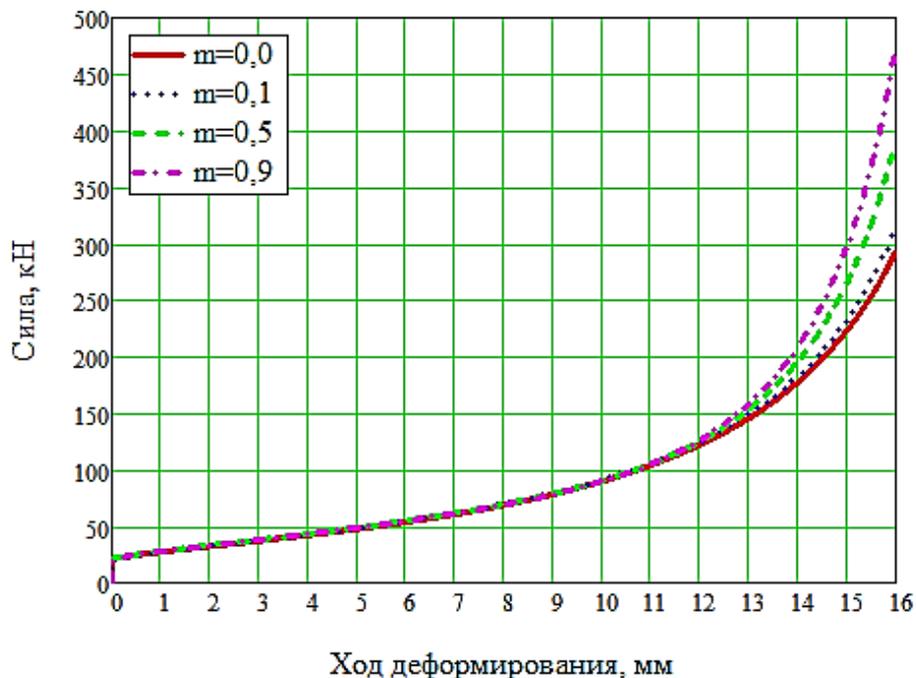


Рис. 7. Графики деформирующей силы по ходу деформирования

Анализ точности построения кривой текучести

Кривые текучести, построенные по результатам испытания, представлены на рис. 8. Ошибка определения истинного напряжения представлена на рис. 9. В диапазоне истинной деформации до 0,8 ошибка не превышает 5 %, а в диапазоне истинной деформации от 0,8 до 1,0 не превышает 10 % вне зависимости от условий контакта на торцах образца. При больших значениях накопленной деформации трение оказывает значительное влияние на точность построения кривой упрочнения. При снижении фактора трения до 0,1 ошибка построения кривой упрочнения для истинных деформаций до 1,6 не превышает 8 %.

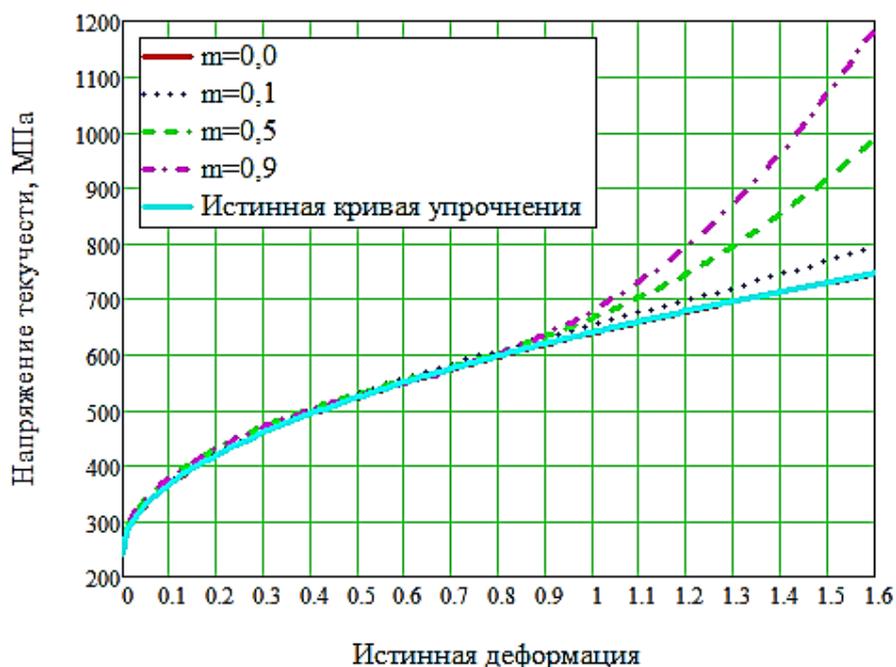


Рис. 8. Кривые упрочнения, построенные по результатам испытания на одноосное сжатие цилиндрического образца

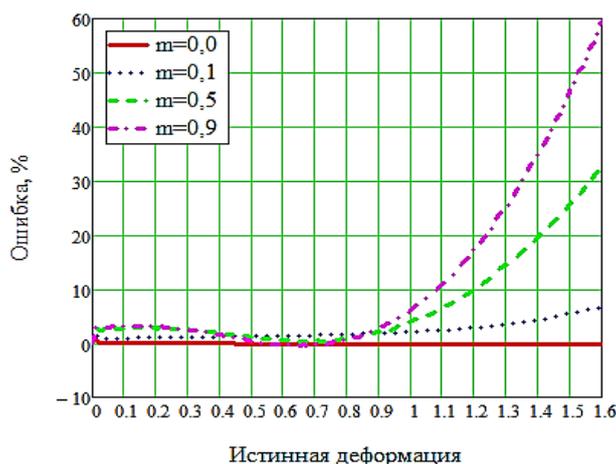


Рис. 9. Ошибка в определении истинного напряжения

ВЫВОДЫ

Испытания на одноосное сжатие позволяют строить кривые упрочнения до степени деформации 0,8 с ошибкой определения напряжения текучести не более 3 % при любом трении на торцах образца. Трение оказывает значительное влияние на ошибку определения напряжения текучести при построении кривой упрочнения при степени деформации более 0,8.

Принятие мер, снижающих фактор трения до 0,05–0,1 позволяет строить кривую упрочнения до степени деформации более 1,5 с ошибкой определения напряжения текучести не более 8 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bridgman P. W. *Studies in Large Plastic Flow and Fracture* / P. W. Bridgman. – New York – London : McGraw-Hill, 1952. – 362 p.
2. Давиденков Н. Н. Анализ напряженного состояния в шейке растянутого образца / Н. Н. Давиденков, Н. И. Спиридонова // *Заводская лаборатория*. – 1945. – Т. XI. – № 6. – С. 583–593.
3. ГОСТ 25.503-97. *Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие*. – Взамен ГОСТ 25.503-80; введ. 1997–11–21. – М. : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997. – 25 с.
4. ASTM E9 Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature.
5. ASTM E209 Practice for Compression Tests of Metallic Materials at Elevated Temperatures with Conventional or Rapid Heating Rates and Strain Rates.
6. Dahl C. Determination of Flow Stress of 1524 Steel at Room Temperature Using the Compression Test / C. Dahl, V. Vazquez, T. Altan // Report ERC/NSM-99-R-22, Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing, The Ohio State University, Columbus, OH, 1999.
7. Henk Vegter et al. Characterisation and modelling of the plastic material behaviour and its application, VII International Conference on Computational Plasticity «COMPLAS VII», Barcelona, 2003.
8. Hockett J. E. The Cam Plastometer / J. E. Hockett // in *Mechanical Testing, Vol 8, ASM Handbook, ASM International, 1985*. – 197 p.
9. Herbertz R. Ein Verfahren Zur Verwirklichung des Reibungsfreien Zylinderstanch versuchs für die Ermittlung von Fliesscurven / R. Herbertz and H. Wiegels // *Stahl Eisen*. – 1981. – Vol 101. – P. 89–92.
10. Lintermanns-Fander K. The Flow and Fracture of Al-High Mg-Mn Alloys at High Temperatures and Strain Rates / K. Lintermanns-Fander. – Ph. D. dissertation, University of Pittsburgh, 1984. – 258 p.
11. Золотаревский В. С. *Механические свойства металлов* / В. С. Золотаревский. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : МИСЦ, 1998. – 400 с.

Алимов А. И. – аспирант МГТУ им. Н. Э. Баумана;

Власов А. В. – д-р техн. наук, проф. МГТУ им. Н. Э. Баумана;

Евсюков С. А. – д-р техн. наук, проф. МГТУ им. Н. Э. Баумана.

МГТУ им. Н. Э. Баумана – Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва, Россия.

E-mail: alimov_ai@bmstu.ru

Статья поступила в редакцию 19.03.2013 г.