

УДК 621.7.011

Алимов А. И.
Власов А. В.**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ КРИВЫХ УПРОЧНЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ИСПЫТАНИЙ НА СЖАТИЕ СТОПКИ ПЕРПЕНДИКУЛЯРНО ПРОСКОСТИ ЛИСТА**

Математическое моделирование в настоящее время является общедоступным инженерным инструментом, который с успехом применяется в промышленности. Для определения напряженно-деформированного состояния и энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением широко применяются программные комплексы, основанные на методе конечных элементов, такие как Deform, QForm, ANSYS, LS-DYNA, AutoForm, PAM-Stamp, Forge и др. Одними из важнейших исходных данных, используемых для расчета в подобных программах, являются кривые упрочнения материала. Соответствие кривой упрочнения с реальным поведением материала определяет адекватность численного расчета методом конечных элементов.

Для построения кривой упрочнения листовых материалов при температуре 20 ± 15 °С осадку в условиях одноосного сжатия реализовать сложно из-за потери устойчивости листа, а испытание на растяжение позволяет строить кривые упрочнения только в области равномерного удлинения (до истинных степеней деформации до 0,2–0,3). Для построения кривой упрочнения листового материала до степеней деформации более 0,3 используют испытания на сжатие «стопки» (рис. 1) [1, 2].

Испытание на сжатие стопки листовых заготовок предложен Павельски [3] в 1967 году как альтернатива традиционной экспериментальной методике определения кривой упрочнения листового проката. В этом испытании используют круглые диски, которые вырезаются из заготовок, сложенные в форме цилиндрического образца с соотношением диаметра к высоте аналогичном используемому в традиционных испытаниях на сжатие сплошных цилиндрических заготовок.

Одним из преимуществ испытания на сжатие стопки является то, что кривая упрочнения, построенная этим методом, достигает более значений истинных деформаций до 1 и выше. Эти испытания не стандартизированы как в России, так и за рубежом [1].



Рис. 1. «Сторпка» для испытания на сжатие

В работе Merklein и Kuppert [1] использовали стопку с соотношением высоты к диаметру равным единице. Вырезанные из листа образцы ориентировали в стопке таким образом, чтобы направления прокатки совпадали. Для снижения влияния трения торцы изолировали от осадочных плит смазанными тефлоновыми пленками. Для точного определения формы заготовки и деформаций в процессе нагружения использовали оптическую систему ARAMIS (GOM, Braunschweig), что позволяло определять деформации на боковой поверхности (рис. 2).

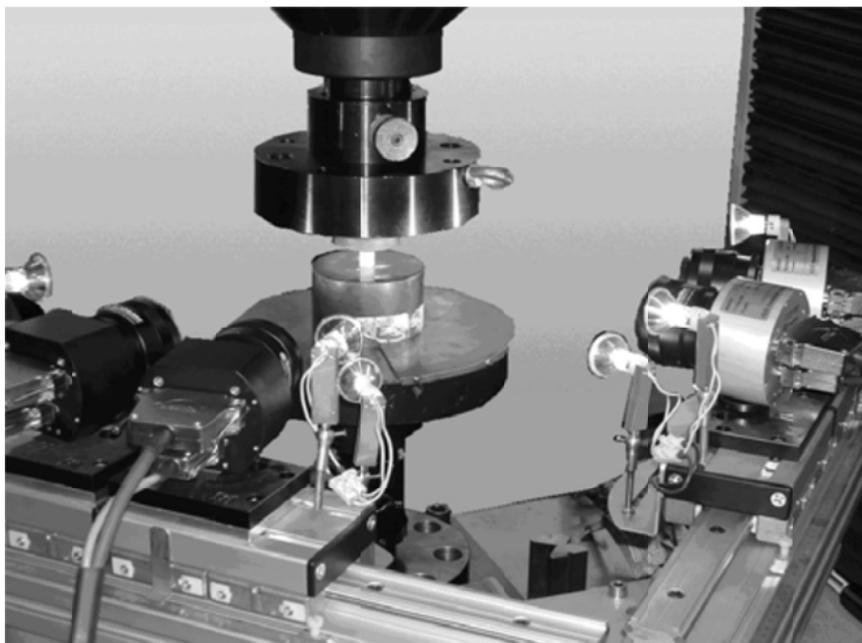


Рис. 2. Установка для оптических измерений деформаций на боковой поверхности образцов при испытаниях на сжатие стопки листовых заготовок

Эффективные деформации определяли по соотношениям Мизеса, основываясь на измерениях оптической системы с учетом закона постоянства объема. Для анизотропных материалов форма заготовок в плане после деформации была эллиптической. Сравнение результатов опытов на сжатие и растяжение, выполненных авторами, показывает их близкое совпадение (рис. 3). К недостаткам методики следует отнести то, что оптические измерения возможны только при относительно больших толщинах листа (в опытах 2,1 мм). Для меньших толщин нанесение специального покрытия на боковую поверхность представляется невозможным. Кроме того, в опытах авторов была достигнута истинная деформация всего 0,4. Авторы не объясняют, почему опыты не были продолжены до больших деформаций. По нашему мнению ограничением являлось обеспечение надежности оптических измерений, а также, возможно, потеря устойчивости листов в стопке.

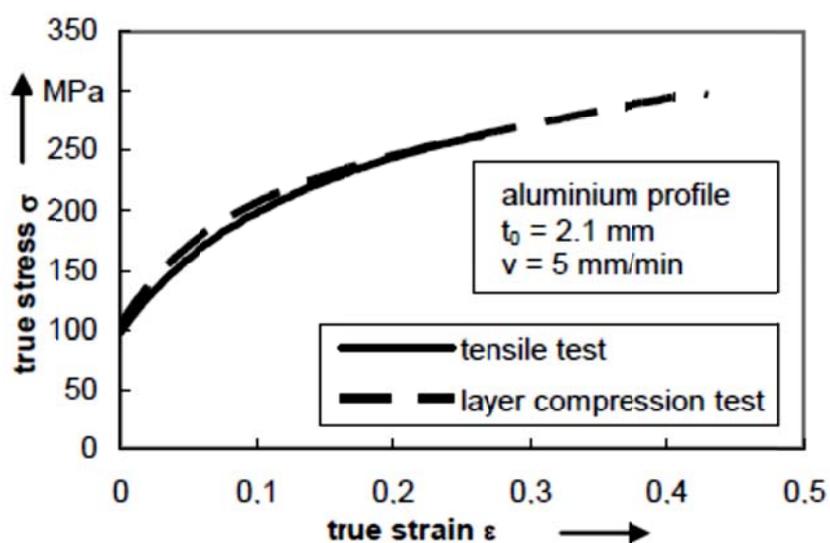


Рис. 3. Сравнение кривых упрочнения, полученных по результатам опытов на растяжение и сжатие стопки

В работе Alves и др. [4] приведены результаты экспериментального исследования и математического моделирования процесса осадки сплошных и многослойных цилиндрических образцов из алюминиевого сплава AA2011. Размеры исследовавшихся образцов приведены на рис. 4.

Case	Height h_0 (mm)	Diameter d_0 (mm)	Aspect ratio h_0 / d_0	Solid/multi-layer
1	3.125	25	0.125	Solid
2	6.25	25	0.25	Solid
3	12.5	25	0.5	Solid
4	25	25	1	Solid
5	25	25	1	2 layers (12.5 mm each)
6	25	25	1	4 layers (6.25 mm each)
7	25	25	1	8 layers (3.125 mm each)

Рис. 4. Размеры образцов, использовавшихся в опытах [4]

Кривая упрочнения, полученная при экспериментальных исследованиях сплошного цилиндрического образца № 4, в дальнейшем использовалась при математическом моделировании процесса осадки методом конечных элементов в двумерной постановке с использованием собственно программы.

Анализ результатов моделирования в сравнении с экспериментальными данными показывает, что чем больше соотношение высоты к диаметру заготовки, тем точнее моделирование воспроизводит реальный процесс (рис. 5). Это, по-видимому, объясняется тем, что с уменьшением соотношения растет влияние сил трения, которое сложно точно учесть при моделировании.

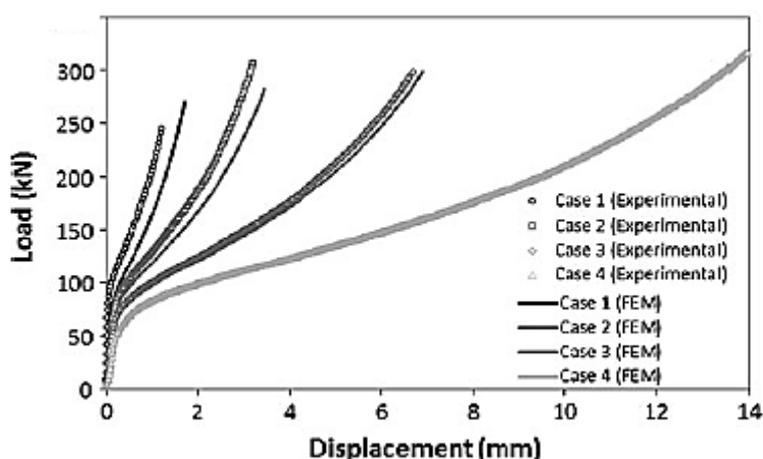


Рис. 5. Сравнение экспериментальных и расчетных кривых осадки сплошных цилиндрических образцов

Экспериментальные данные показывают, что при одинаковом соотношении высоты к диаметру кривые нагрузки для сплошных и многослойных заготовок практически не отличаются (рис. 6). Различие в пределах 2 % появляется только при больших деформациях. Соответственно кривые упрочнения, полученные по результатам обработки кривых нагружения, также практически совпадают (рис. 7).

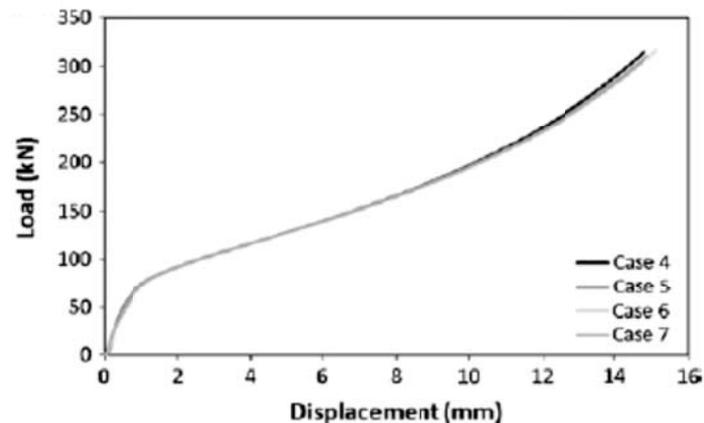


Рис. 6. Нагрузочные графики при осадке многослойных образцов

На основе конечно-элементного анализа деформации двухслойного образца при различных условиях трения авторы делают вывод, что экспериментальная подготовка стопки должна обеспечить максимальное трение (в идеале – условия прилипания) между соседними дисками в целях обеспечения однородного напряженно-деформированного состояния. Скольжение между соседними дисками вызывает неоднородность деформации, которые в свою очередь будут вызывать неоднородность напряжений. Однако, характер нагрузочной кривой изменяется незначительно при замене условий прилипания на условие скольжения между соседними дисками.

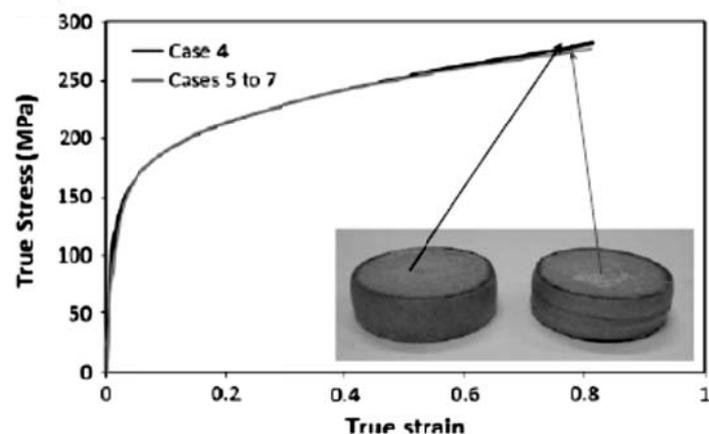


Рис. 7. Кривые упрочнения, построенные по результатам опытов на сжатие сплошных и многослойных цилиндрических образцов

Целью работы является теоретическое обоснование возможности построения кривых упрочнения с помощью испытаний на сжатие стопки перпендикулярно плоскости листа.

Проводилось моделирование серии испытаний на одноосное сжатие стопки из цилиндрических образцов диаметром 10 мм и высотой 1 мм (10 штук, общая высота 10 мм). В качестве фактора варьирования был взят фактор трения, интервал варьирования 0,1–0,9 с шагом 0,4.

Т. к. образцы осесимметричны, а также они симметричны относительно экваториального сечения стопки и условия трения одинаковые на обеих контактных поверхностях, то рассчитывалась четверть сечения стопки. Сечение каждого образца разбивалось на 1000 конечных элементов встроенным генератором сетки. На нижней поверхности стопки задавалось граничное условие в виде скорости, равной 0. Шаг расчета соответствует перемещению деформирующего инструмента на 0,005 мм. Испытание продолжалось до расчетной истинной деформации 0,5 (394 шага).

Кривую упрочнения строили по следующим формулам:

$$\sigma_s = \frac{P_i}{F_i} = \frac{P_i}{nH_0F_0} (nH_0 - S),$$

где S – ход деформирования;

P – сила деформирования;

H_0 – начальная высота образца;

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

n – количество образцов в стопке;

$$\varepsilon = \ln \left(\frac{nH_0}{nH_0 - S} \right).$$

Фактор трения $m = 0,1$ для всех контактирующих поверхностей

До момента начала выдавливания образца деформация достаточно однородна, имеется небольшая зона затрудненной деформации на торцах образца. Выдавливание образца начинается при ходе 1,23 мм, что соответствует истинной деформации 0,282. Поле накопленной деформации образца представлено на рис. 8.

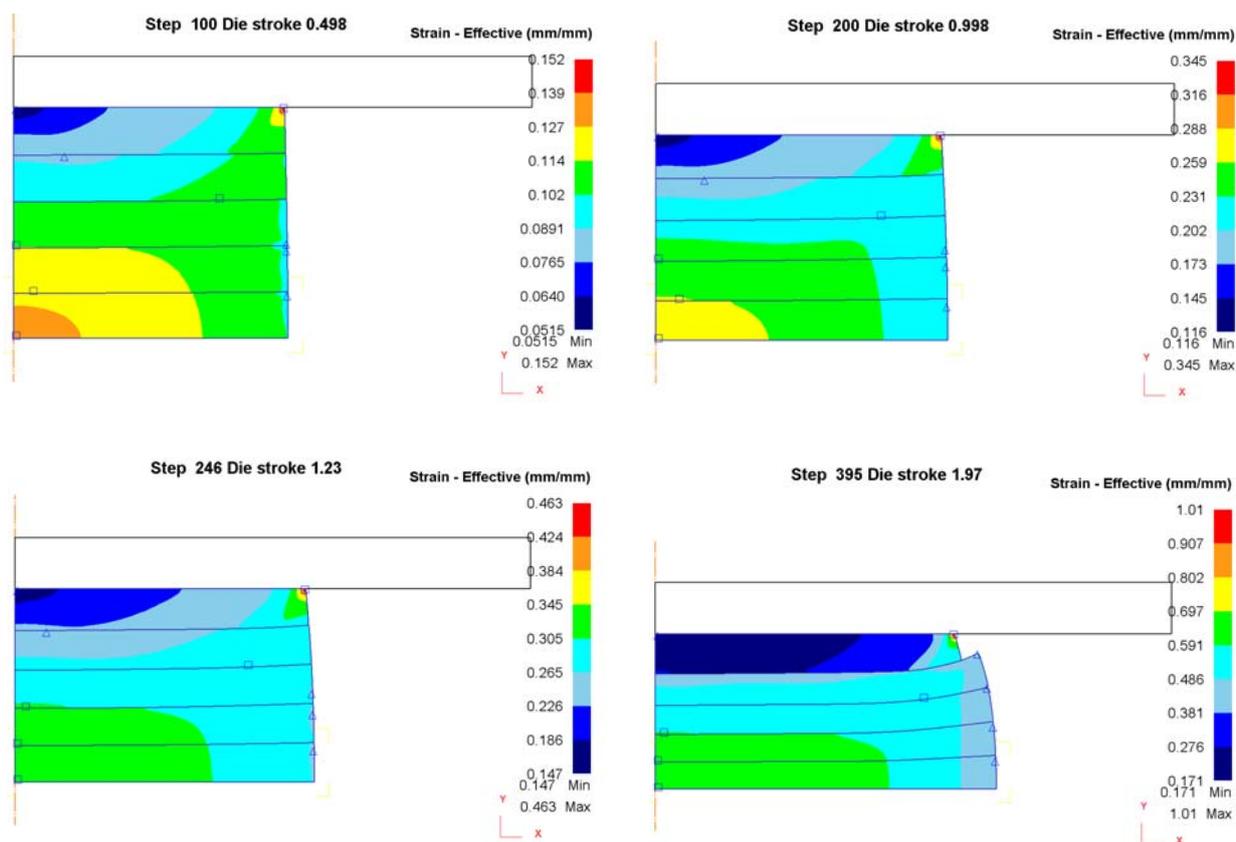


Рис. 8. Распределение накопленных деформаций, $m = 0,1$

Фактор трения $m = 0,5$ для всех контактирующих поверхностей

Деформация в процессе всего испытания неоднородна (рис. 9), имеется значительная зона затрудненной деформации на торцах. При ходе 1,49 (истинная деформация 0,354) зона затрудненной деформации увеличивается. Выдавливание образца начинается при ходе 1,79 мм, что соответствует истинной деформации 0,443.

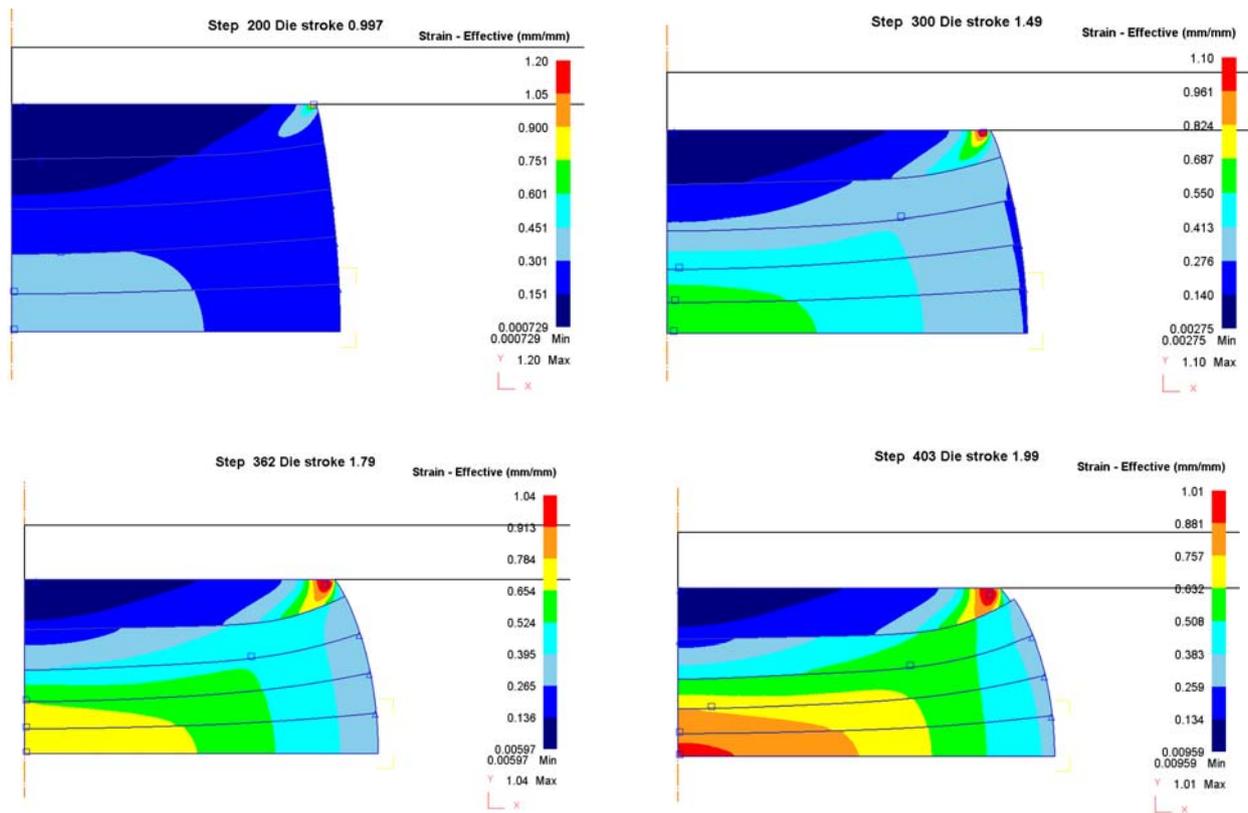


Рис. 9. Распределение накопленных деформаций, $m = 0,5$

Фактор трения $m = 0,9$ для всех контактирующих поверхностей

Деформация в процессе всего испытания неоднородна (рис. 10), имеется значительная зона затрудненной деформации на торцах. Выдавливание образца из стопки не происходит. Скольжение по контактной поверхности стопки с инструментом практически отсутствует, площадь контакта увеличивается за счет фолдинга.

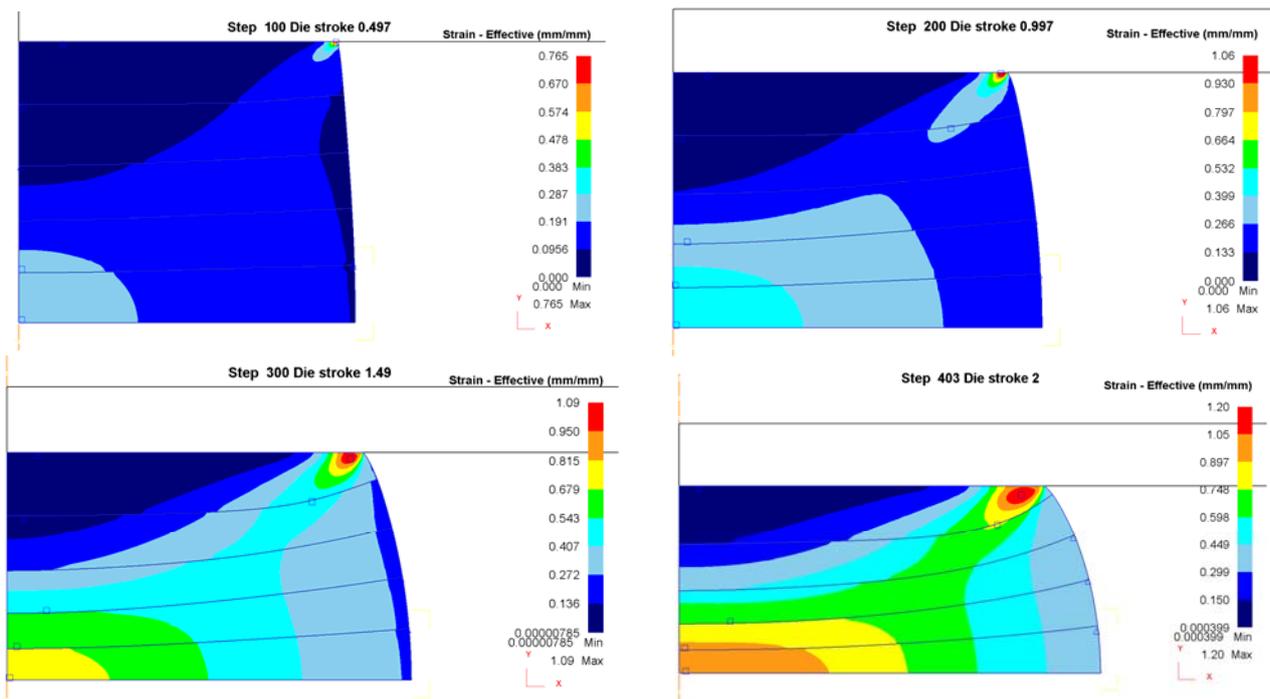


Рис. 10. Распределение накопленных деформаций, $m = 0,9$

На рис. 11 представлены кривые упрочнения, полученные по виртуальным испытаниям на осадку стопки.

Видно, что выдавливание образца из стопки ведет к снижению силы, что не может не сказаться на точности определения истинного напряжения текучести. На рис. 12 представлен график ошибки определения истинного напряжения текучести. Трение оказывает значительное влияние на ошибку. До степени деформации 0,3 ошибка определения истинного напряжения текучести не превышает 7 % при любом трении.

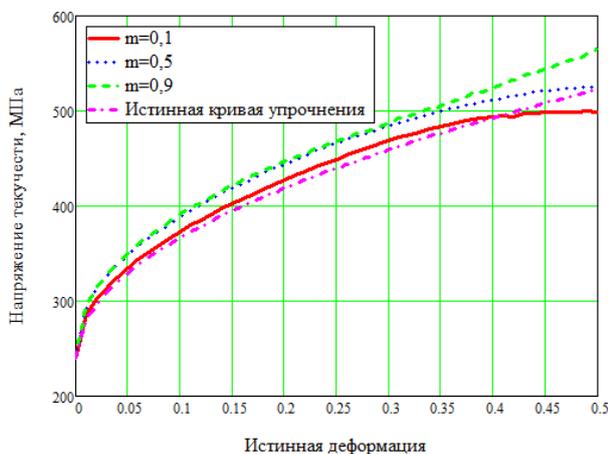


Рис. 11. Кривые упрочнения по опытам на осадку стопки

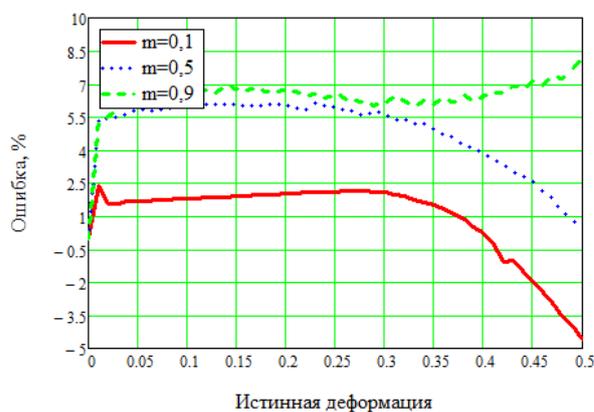


Рис. 12. Ошибка определения кривых упрочнения по опытам на осадку стопки

ВЫВОДЫ

Испытания на осадку стопки позволяют строить кривую упрочнения до истинной деформации 0,5 с ошибкой в определении напряжения текучести не более 8 %.

Критерием неудачного испытания можно считать выдавливание образца из стопки.

Трение на контактных поверхностях влияет на ошибку определения истинного напряжения текучести и его следует уменьшать.

Зависимость ошибки определения напряжения текучести от накопленной деформации является близкой к линейной, таким образом, можно провести корректировку и снизить ошибку.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Merklein M., Kuppert A. *A Method For The Layer Compression Test Considering The Anisotropic Material Behavior, From the issue entitled "Proceedings of the 12th ESAFORM Conference on Material Forming, Enschede (Netherlands), 27–29 April 2009 (edited by A.H. van den Boogaard and R. Akkermann, University of Twente)".*
2. Kuwabara T. *Advances In Experiments On Metal Sheets And Tubes In Support Of Constitutive Modeling And Forming Simulations, International Journal of Plasticity, 23 (2007). – P. 385–419.*
3. Pawelski O. *Über das stauchen von holzylindern und seine eignung zur bestimmung der formänderungsfestigkeit dünner bleche. Arch Eisenhüttenwes, 1967, 38:437–442.*
4. Alves L. M., Nielsen C. V., Martins P. A. F. *Revisiting the Fundamentals and Capabilities of the Stack Compression Test, Experimental Mechanics, (2011) 51. – P. 1565–1572.*

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

Власов А. В. – 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 19.02.2013 г.