

УДК 621.7.011

Воронков В. И.  
Потапенко К. Е.  
Петров П. А.  
Гамзина О. Ю.

### ПОЛУЧЕНИЕ УТОЧНЁННЫХ ДАННЫХ ПО СОПРОТИВЛЕНИЮ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ОБЪЁМНОЙ ШТАМПОВКЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМг6

Точность расчётов процессов горячей объёмной штамповки зависит от применяемого математического метода, корректности задания граничных условий и свойств деформируемого материала. Благодаря использованию коммерческих программ, предназначенных для моделирования процессов обработки металлов давлением, перед технологом не возникает проблемы математического описания рассчитываемой технологической операции. Как правило, в современных программах используется метод конечных элементов (МКЭ): Qform, Forge, Deform и др. Точность описания граничных условий также зависит от возможностей программы и от опыта пользователя, который должен хорошо представлять, как именно, посредством предложенных параметров задачи, максимально приблизить моделирование к реальному процессу деформирования. Иначе обстоит дело с данными по свойствам материалов. Во всех коммерческих программах база данных материалов является открытой, т. е. пользователь может самостоятельно определить свойства деформируемого материала. Обязательное наличие такой возможности вызвано тем, что предлагаемые базы данных материалов не полные и не всегда обеспечивают требуемую точность расчётов. Общепринято, что допустимая погрешность моделирования, которую можно оценить по сопоставлению расчётных ( $P_{расч}$ ) и экспериментальных ( $P_{эксп}$ ) графиков силы деформации, лежит в диапазоне  $\pm 2,5\%$ :

$$\delta = \left| \frac{P_{расч} - P_{эксп}}{P_{эксп}} \times 100\% \right| \leq 2,5\% . \quad (1)$$

Для достижения указанной точности расчётов (если, конечно, используемый программный продукт принципиально позволяет её достигнуть) перед технологом при постановке задачи моделирования может возникнуть проблема ввода точных данных по сопротивлению деформируемого материала пластической деформации. В большинстве известных программ данные по сопротивлению материала пластической деформации представляют собой таблично-заданные кривые текучести (зависимость напряжения текучести от накопленной деформации), определённые для фиксированных значений скорости деформации и фиксированных значений температур, лежащих в диапазоне горячей штамповки рассматриваемого материала. Также данные по сопротивлению деформации могут быть заданы при помощи математической модели. Наиболее распространённые представляют собой функцию вида  $\sigma_i = f(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}, T)$ , где  $\sigma_i$  – напряжение текучести;  $\varepsilon_i$  – накопленная деформация;  $\dot{\varepsilon}$  – скорость деформации;  $T$  – температура. Подобная модель используется, например, в программах Forge и Qform.

Получить данные о сопротивлении пластической деформации конкретного материала можно по результатам механических испытаний и последующего пересчёта полученных диаграмм силы по формулам, согласно какой-либо известной методике [3]. Подобный подход позволяет получить кривые текучести материала, пригодные для моделирования технологических операций, не требующих высокой точности расчёта энергосиловых параметров

процесса и точного анализа течения материала в штампе. Однако для расчёта процессов штамповки, характеризующихся сложным течением металла в полости штампа [4, 5], требуются уточнённые данные по сопротивлению металла пластической деформации.

Целью данной работы является получение уточнённых данных по сопротивлению пластической деформации при горячей объёмной штамповке алюминиевого сплава АМг6, позволяющих получить результат моделирования, удовлетворяющий выражению (1). Получение уточнённых данных по сопротивлению пластической деформации основано на применении инверсионного моделирования (метод постановки обратной задачи).

По результатам механических испытаний методом сжатия цилиндрического образца были получены диаграммы «ход-сила». Механические испытания проводили на универсальной испытательной машине INSTRONVHS400 kN (VHS8800 family)\*, в изотермических условиях без нанесения смазки на контактную поверхность образцов. Для осадки были изготовлены цилиндрические образцы высотой – 10 мм и диаметром – 10 мм. Испытания проводились при температурах 250 °С, 300 °С, 350 °С и 430 °С при постоянных скоростях деформации 0,1 с<sup>-1</sup>, 1 с<sup>-1</sup>, 10 с<sup>-1</sup> и 50 с<sup>-1</sup>.

Отсутствие смазки при испытаниях увеличивает влияние контактного трения на получаемые экспериментальные результаты. Осадка образцов с начальным отношением высоты к диаметру  $h_0/d_0 = 1$  при больших степенях накопленной деформации  $\varepsilon > 0,3 \div 0,4$  также даёт завышенный результат по силе [1]. Трудности создания линейного напряжённого состояния при осадке образца являются самым главным недостатком данного вида испытаний. Однако, использование метода постановки обратной задачи с применением хорошо отлаженного конечно-элементного программного кода даёт возможность при обработке данных учесть указанные погрешности эксперимента путём точного воспроизведения испытаний при моделировании. При этом даже наоборот, применение смазки, снижающей трение, нежелательно, т. к. неизбежная неравномерность нанесения смазки на контактные поверхности будет существенно осложнять описание трения при постановке задачи инверсионного моделирования. Кроме того наличие смазки будет осложнять решение температурной задачи, что также может стать одной из причин неточного моделирования. При использовании инверсионного моделирования начальное отношение  $h_0/d_0$  не имеет большого значения. Корректный результат можно получить при проведении испытаний с отношением  $h_0/d_0 \geq 0,8$  [1]. Стоит учитывать, что при малых отношениях  $h_0/d_0$ , количество итераций при которых достигает требуемой точности, искомым кривых текучести может быть больше, а при больших отношениях  $h_0/d_0$  может произойти потеря устойчивости образца. Кроме того, при больших отношениях  $h_0/d_0$  на процесс осадки будет оказывать влияние косина торца образца, которая является случайной величиной, а, следовательно, не может быть учтена при моделировании.

Суть метода постановки обратной задачи заключается в воспроизведении механических испытаний путём моделирования, сравнения полученных расчётных диаграмм силы с экспериментальными и корректировки данных о сопротивлении исследуемого материала пластической деформации на основании указанного сравнения.

Каждая экспериментальная диаграмма силы соответствует своим условиям эксперимента. При проведении механических испытаний методом осадки цилиндрических образцов из сплава АМг6 варьируемыми параметрами эксперимента являлись температура и скорость деформации. На каждом этапе инверсионного моделирования необходимо рассчитать задачи осадки образца для всех вариантов проведённых экспериментов и произвести сравнение всех экспериментальных диаграмм сил с расчётными. После чего, в данные о сопротивлении пластической деформации вносятся соответствующие изменения, и осуществляется новый этап моделирования механических испытаний. Конечная цель расчётов – достигнуть, за счёт корректировки данных о сопротивлении материала пластической деформации, сходимости всех расчётных диаграмм силы с экспериментальными (рис. 1), с учётом точности, задаваемой выражением (1).

---

\* Оборудование установлено в институте обработки металлов давлением Технического университета им. Лейбница (г. Ганновер, Германия).

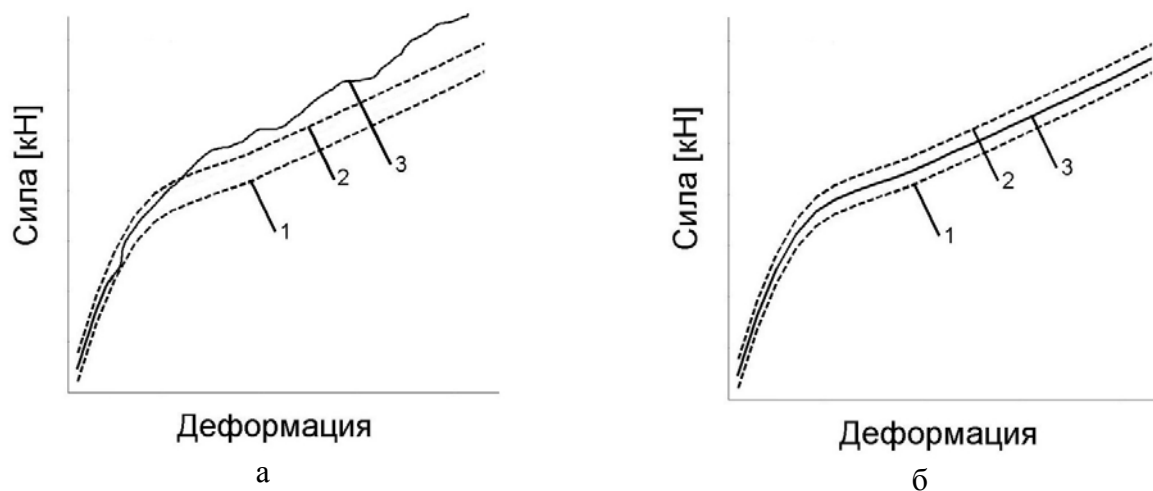


Рис. 1. Сравнение диаграмм силы до корректировки данных о сопротивлении материала пластической деформации (а) и после (б):

1, 2 – границы доверительного интервала; 3 – кривые силы, полученные при моделировании

Как уже говорилось, данные о сопротивлении материала пластической деформации могут быть заданы при помощи кривых текучести, представляющих собой табличные функции или модели сопротивления деформации. При втором способе ввода данных применить для корректировки математический метод оптимизации и, тем самым, автоматизировать процесс гораздо проще. Однако необходимо учитывать следующие сложности.

1. Для автоматической оптимизации необходимо использовать собственный метод расчёта, т. к. коммерческие программы, как правило, имеют достаточно закрытый программный код. Разработать программный код, который будет обеспечивать достаточную точность моделирования процесса осадки является сложной задачей. А применение упрощённых методов расчёта, с большим количеством допущений, сведёт на нет процесс оптимизации, т. к. на расхождение данных моделирования и эксперимента будет оказывать влияние не только данные о сопротивлении деформации, но и погрешность расчёта. Т. к. осадка образца является хрестоматийной задачей обработки металлов давлением, то в большинстве коммерческих программ моделирование осадки рассчитывается очень точно (конечно, при условии грамотной постановки задачи). Так, например, Резвых и Мордвинцев успешно применяют программу Qform для актуализации реологической модели материала в условиях производства [2].

2. В коммерческих программах может быть реализована возможность применения одной или нескольких моделей сопротивления деформации. Однако, изменение напряжения текучести в зависимости от накопленной деформации, скорости деформации и температуры может иметь сложный характер, который предлагаемые математические модели не могут описать. В этом случае данные о сопротивлении пластической деформации нужно задавать при помощи кривых текучести, заданных таблично.

Для получения уточнённых данных по сопротивлению пластической деформации алюминиевого сплава АМг6 авторами данной статьи применялся метод постановки обратной задачи, реализованный при помощи программы Qform. Данные о сопротивлении пластической деформации задавались таблично (рис. 2) кривыми текучести, определёнными для температур 250 °С, 300 °С, 350 °С, 430 °С и скоростей деформации 0,1 с<sup>-1</sup>, 1 с<sup>-1</sup>, 10 с<sup>-1</sup>, 50 с<sup>-1</sup>, т. е. первое приближение кривых текучести (ещё не скорректированных) было получено при пересчёте экспериментальных диаграмм силы. Для большего приближения начальных кривых текучести к «истинным» и, соответственно, уменьшения этапов корректировки, начальные кривые текучести определяли с учётом влияния теплового эффекта пластической деформации, теплового эффекта трения и контактного трения [3].

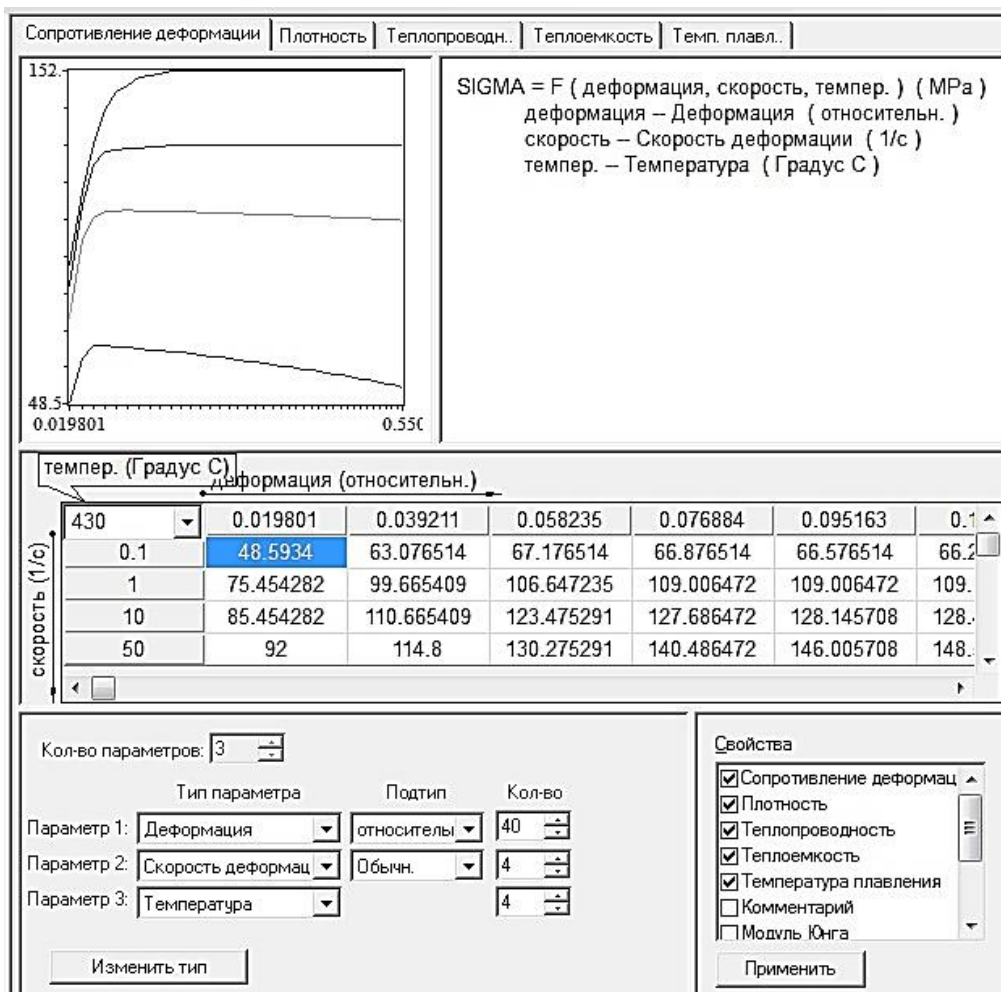


Рис. 2. Ввод данных о сопротивлении деформации в программе Qform

Первый этап моделирования механических испытаний выявил существенные расхождения между расчётными и экспериментальными диаграммами силы. На рис. 3 показаны некоторые примеры сравнения расчётной диаграммы с экспериментальной. Экспериментальная диаграмма представлена в виде доверительного интервала, составляющего  $\pm 2,5\%$ .

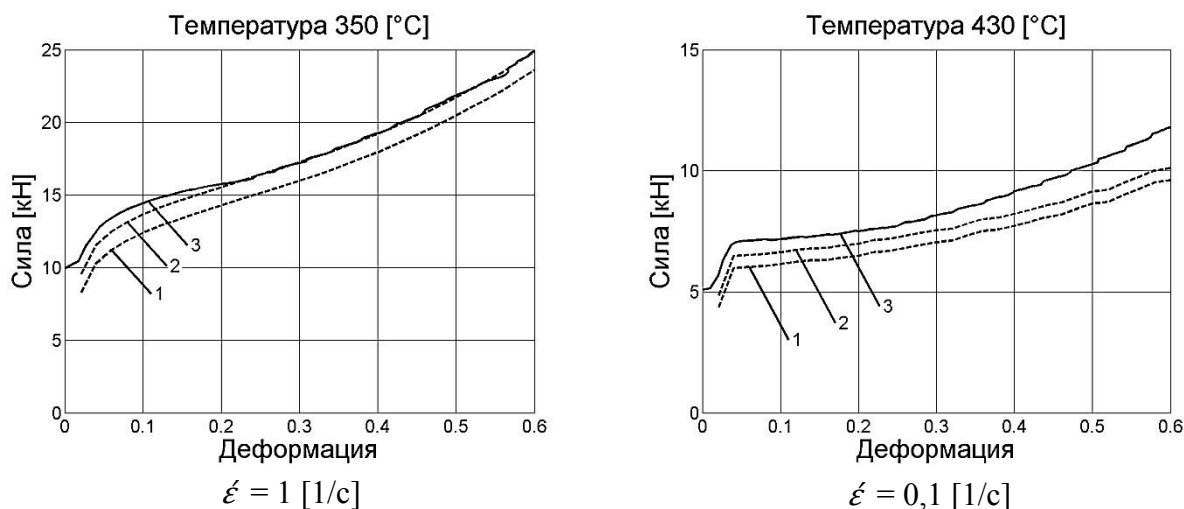


Рис. 3. Сравнение расчётных и экспериментальных диаграмм силы до корректировки кривых текучести методом инверсионного анализа:

1, 2 – границы доверительного интервала; 3 – кривые силы, полученные при моделировании

После шести этапов моделирования была достигнута требуемая сходимость результата расчётов и эксперимента (рис. 4). На рис. 5 показаны полученные кривые текучести алюминиевого сплава АМг6.

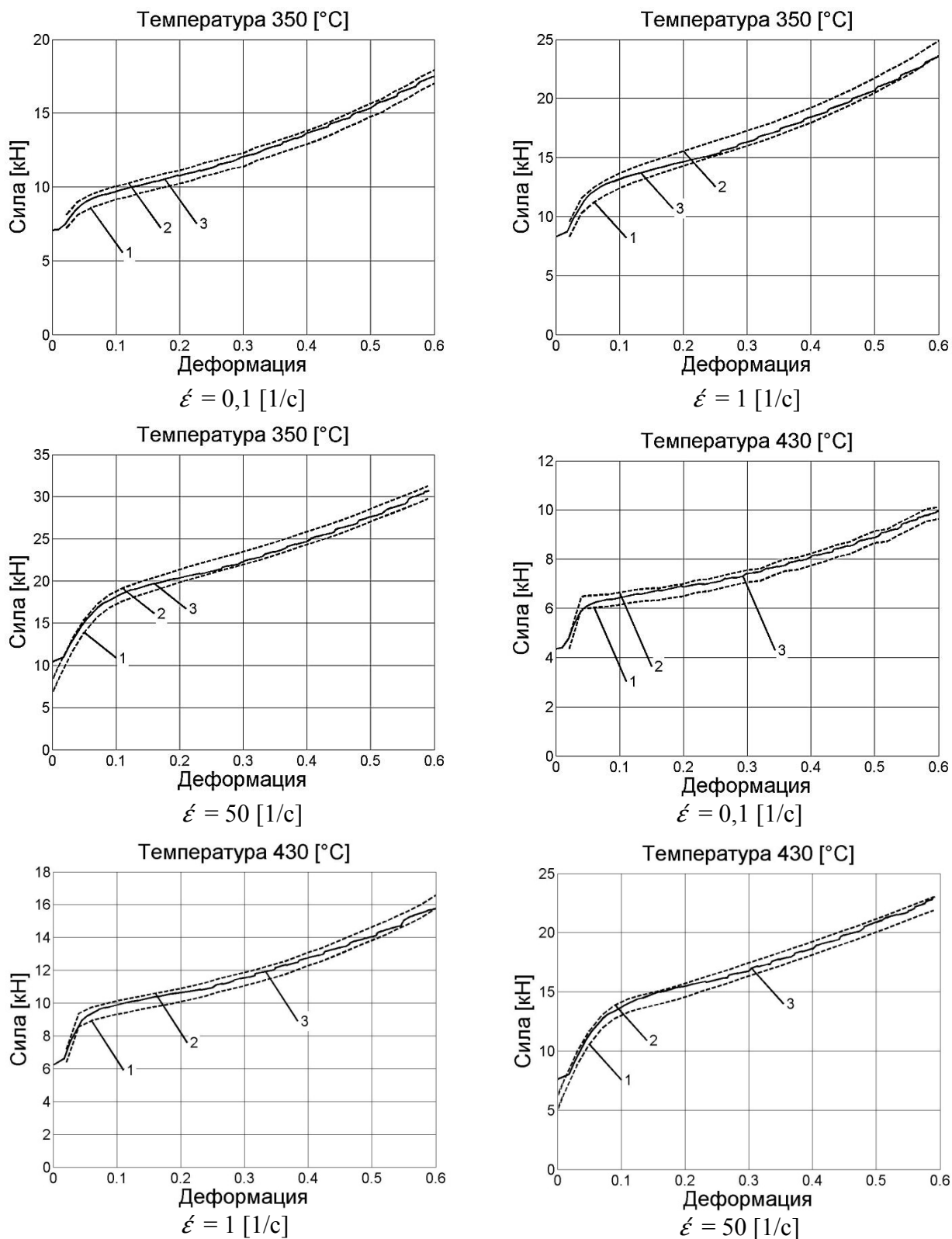


Рис. 4. Сравнение расчётных и экспериментальных диаграмм силы после корректировки кривых текучести методом инверсионного анализа:

1, 2 – границы доверительного интервала; 3 – кривые силы, полученные при моделировании

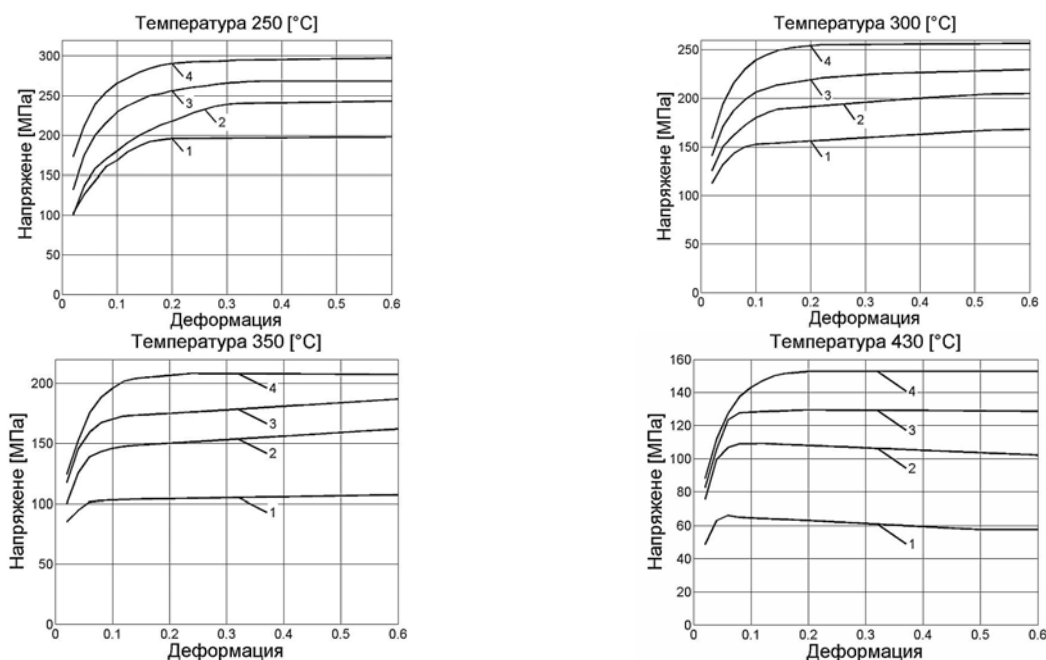


Рис. 5. Кривые текучести алюминиевого сплава АМг6:  
1 –  $0,1 \text{ c}^{-1}$ ; 2 –  $1 \text{ c}^{-1}$ ; 3 –  $10 \text{ c}^{-1}$ ; 4 –  $50 \text{ c}^{-1}$

### ВЫВОДЫ

Как видно из рис. 4, при постановке задачи моделирования с использованием кривых текучести, полученных после корректировки методом постановки обратной задачи, результаты расчётов соответствуют требуемой точности. Следовательно, полученные кривые текучести могут использоваться для моделирования процессов горячей объёмной штамповки алюминиевого сплава АМг6 в диапазоне температур 250–430 °С и при скоростях деформации от  $0,1 \text{ c}^{-1}$  до  $50 \text{ c}^{-1}$ .

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (ГК № 14.В37.21.0874, шифр проекта «№ 2012-1.5-12-000-1004-011»).

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Parteder E. Determination of flow curves by means of a compression test under sticking friction conditions using an iterative finite-element procedure / E. Parteder, R. Brinten // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1998. – № 74. – P. 227–233.
2. Резвых Р. В. Актуализация модели для расчётов процессов холодной объёмной штамповки в программе QForm / Р. В. Резвых, П. С. Мордвинцев // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. – 2012. – № 6. – С. 25–30.
3. Петров П. А. Построение «изотермической» кривой текучести алюминиевого сплава АМг6 / П. А. Петров, А. В. Дубинчин // *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. – Краматорск: ДГМА, 2008. – № 1 (19). – С. 145–150.
4. Разработка технологии изотермической штамповки детали «корпус муфты» из алюминиевого сплава АД-35 // *Цветные металлы 2011: сборник докладов третьего международного конгресса*. – Красноярск, 2011. – С. 590–596.
5. Петров П. А. Разработка и исследование технологии точной штамповки деталей из алюминиевых сплавов на основе компьютерного моделирования / П. А. Петров // *Материалы третьей научно-технической конференции «Металлофизика, механика материалов, наноструктуры и процессы деформирования. Металл-деформ-2009»*. – Самара: СГАУ, 2009. – Т 2. – С. 174–183.

Потапенко К. Е. – ассистент Университета машиностроения;

Воронков В. И. – ст. преп. Университета машиностроения;

Петров П. А. – канд. техн. наук, доц., зав. каф. Университета машиностроения;

Гамзина О. Ю. – магистр Университета машиностроения.

Университет машиностроения – Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ), г. Москва, Россия.

E-mail: konpot88@mail.ru; v-i-w@bk.ru; p.petrov@mami.ru; olgagamzina.90@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25.03.2013 г.