

УДК 621.73.06-52

Петров П. А.

ПОСТРОЕНИЕ «ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ» КРИВОЙ ТЕКУЧЕСТИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА В95

В последние 10–15 лет при разработке новых технологий штамповки, в частности объемной, все большее применение находят методы математического моделирования, например, основанного на методе конечных элементов (МКЭ). Этот метод был положен в основу таких систем, предназначенных для моделирования технологических процессов объемной штамповки, как «QForm» (Россия), «Deform» (США), «Forge» (Франция). При подготовке данных для моделирования в любой из перечисленных систем необходимо задать данные о сопротивлении деформации материала заготовки, характеристики технологической смазки и характеристики кузнечно-прессового оборудования, применяемого для изучаемого процесса штамповки.

Известно, что все энергосиловые параметры технологического процесса обработки давлением определяются расчетным путем с точностью до величины сопротивления деформации. Таким образом, точность выполнения расчета при математическом (численном) моделировании определяется достоверностью задаваемых данных о сопротивлении исследуемого материала пластической деформации, т. е. о кривых текучести деформируемого материала.

Экспериментальные кривые текучести отражают не только влияние упрочнения-разупрочнения деформируемого материала на величину напряжения текучести, но также и влияние контактного трения и теплового эффекта пластической деформации на сопротивление деформации. Для численного решения краевой задачи обработки металлов давлением необходимо скорректировать полученные экспериментальные кривые текучести на величину изменения сопротивления деформации вследствие влияния контактного трения и вследствие влияния теплового эффекта пластической деформации. В противном случае в процессе решения краевой задачи эти эффекты будут учтены дважды. Первый раз учет этих эффектов – контактного трения и теплового эффекта – будет выполнен при задании экспериментальных кривых текучести; второй раз – в ходе решения тепловой и контактной задач [1, 2].

Известны работы зарубежных ученых, в которых отмечалась важность проведения подобного рода исследований. К наиболее значимым исследованиям можно отнести работы, выполненные К. М. Селларсом [3] и М. Аббодом [4].

Целью данной статьи является построение «изотермической» кривой текучести алюминиевого сплава В95 при различных температурно-скоростных условиях его деформирования.

Изотермическая кривая текучести представляет собой зависимость напряжения текучести от величины накопленной деформации и отражает изменение напряжения текучести только вследствие действия в деформируемом материале процессов, связанных с его упрочнением-разупрочнением. При этом кривые текучести скорректированы на величину изменения напряжения текучести из-за теплового эффекта пластической деформации и на величину изменения напряжения текучести, обусловленного влиянием контактного трения.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

- 1) выполнить экспериментальные исследования сопротивления сплава В95 деформации при температурах 300–450 °С и в диапазоне скоростей деформации 0,1–10 с⁻¹;
- 2) выполнить расчет изменения напряжения текучести, обусловленного влиянием контактного трения;
- 3) выполнить расчет изменения напряжения текучести из-за теплового эффекта пластической деформации.

Сплав В95 относится к деформируемым сплавам на основе системы Al–Zn–Mg–Cu. Сплавы этой системы хорошо деформируются в горячем состоянии; отличаются склонностью

к коррозии под напряжением, пониженной статической выносливостью, склонностью к появлению трещин при непрерывной отливке слитков. Сплав В95 является основным представителем системы Al–Zn–Mg–Cu и широко применяется в виде катанных и прессованных изделий. Температурный интервал деформирования сплава В95 в горячем состоянии 350–430 °С. Химический состав сплава В95 представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав сплава В95

Химические элементы	Al	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Mn	Cr	Ti
%	88,37	5,84	2,83	1,67	0,32	0,14	0,3	0,14	< 0,05

В данной работе кривые текучести были получены по результатам испытаний образцов сплава В95 размером $\varnothing 10 \times 10$ мм сжатием при температуре от 350 °С до 450 °С. Испытания проводились на универсальной испытательной машине INSTRON VHS400 kN¹. Скорость деформации в процессе испытания поддерживалась постоянной и равной 0,1 с⁻¹, 1,0 с⁻¹ и 10,0 с⁻¹. Каждый образец осаживали на 60 % от исходной его высоты.

Образцы исследуемого сплавов нагревали до требуемой температуры в специальном контейнере. Холодный образец помещали в предварительно нагретый до температуры испытания контейнер. Далее контейнер с холодным образцом помещали в печь электросопротивления. Печь предварительно также нагревалась до температуры испытания. Контроль температуры внутри контейнера осуществлялся с помощью термопары тип К (хромель-алюмель). Время нагрева образца до температуры осадки составляло около 20 мин. После нагрева образца до требуемой температуры, контейнер вместе с образцом извлекался из печи и устанавливался на неподвижный стол испытательной машины для проведения испытания в соответствии с заданной программой нагружения. В качестве смазки при сжатии образцов применялся мелкодисперсный графит (марка «ConTraet G300» производства фирмы «FUCHS Lubritech»). На рис. 1 представлены экспериментальные кривые текучести, рассчитанные по индикаторным диаграммам в предположении, что деформация однородная и влияние контактного трения отсутствует. Однако в условиях эксперимента эти допущения не соблюдались полностью; боковая поверхность осажённых образцов искажалась в процессе деформации (рис. 2).

Начиная со значения деформации $\varepsilon_l = 0,6$, на экспериментальных кривых текучести сплава В95 (см. рис. 1) наблюдается увеличение напряжения текучести. Эта особенность экспериментальных кривых текучести обусловлена соотношением размеров исходных образцов сплава В95 ($H_0/D_0 = 1$) и связана с влиянием контактного трения на величину сопротивления деформации. Учет контактного трения выполнен на основе подхода, изложенного в работе [5].

На рис. 3 показаны «изотермические» кривые текучести сплава В95. Кривые имеют форму, характерную для горячедеформированного алюминиевого сплава. На полученных кривых текучести наблюдается максимум напряжения текучести. Положение максимума зависит от значения скорости деформации. Практически для всех температурно-скоростных условий деформирования на кривых после максимума имеется достаточно продолжительный участок, соответствующий установившемуся течению материала. Для сплава В95 этот участок начинается при достижении деформации 0,05–0,1 в зависимости от сочетания термомеханических параметров – скорости деформации и температуры (см. рис. 3).

Проверка корректности расчета «изотермических» кривых текучести сплава В95 выполнена с применением компьютерного конечно-элементного моделирования (КЭМ) в системе «Forge_2007».

¹ Испытания выполнялись в лаборатории Института обработки металлов давлением Технического Университета им. Лейбница (г. Ганновер, Германия).

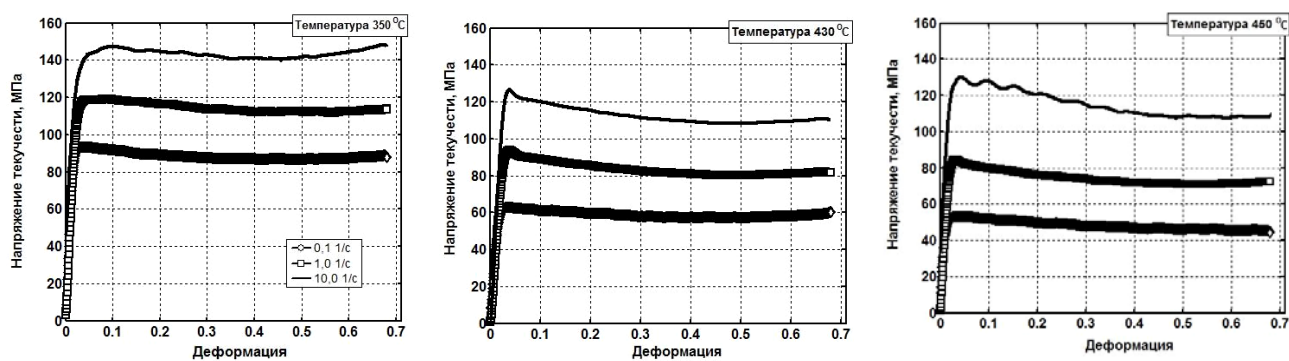


Рис. 1. Экспериментальные кривые текучести



Рис. 2. Внешний вид образцов после деформации

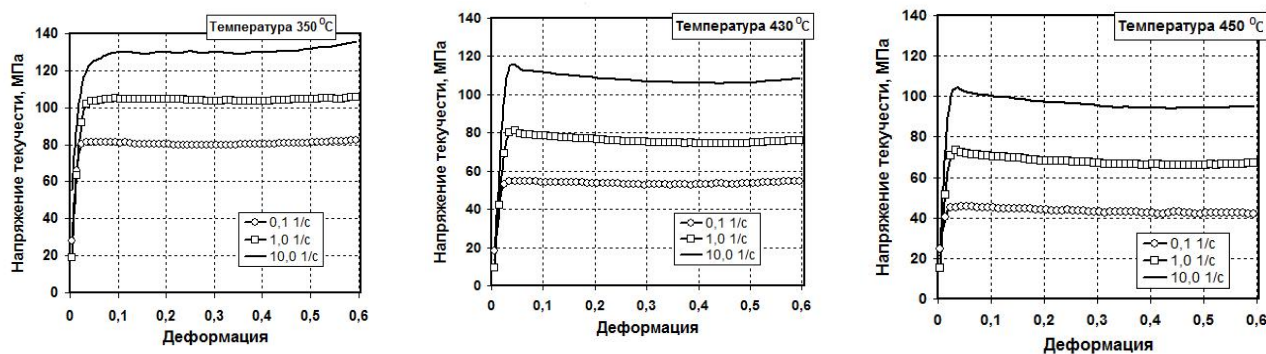


Рис. 3. «Изотермические» кривые текучести

В системе «Forge-2007» проведено моделирование испытания цилиндрического образца сплава В95 сжатием. В качестве исходных кривых текучести заданы «изотермические» кривые текучести (рис. 3). Используя критерий (1) проведена корректировка «изотермических» кривых текучести, основанная на выполнении 30 расчетов в системе «Forge_2007».

Критерий оценки точности моделирования был принят следующий:

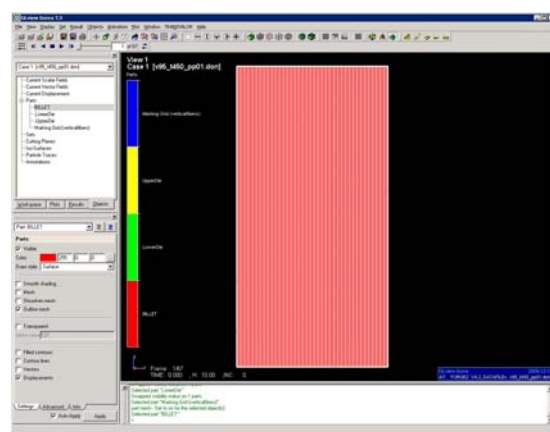
$$\delta = \left| \frac{P_{FEM} - P_{эксп}}{P_{эксп}} \times 100\% \right| \leq 2,5\%, \quad (1)$$

где δ – относительная погрешность измерений; P_{FEM} – сила деформирования, определенная по результатам расчета в конечно-элементной программе; $P_{эксп}$ – сила деформирования, измеренная в опыте.

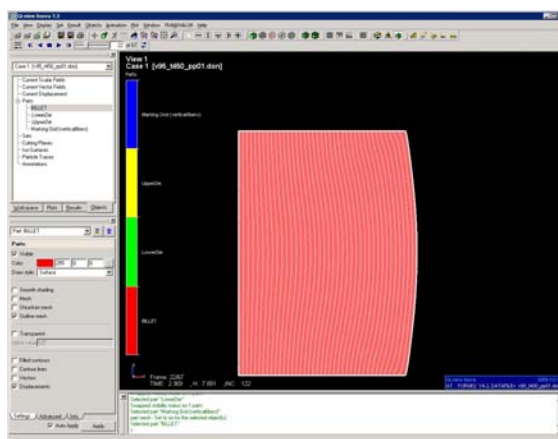
Если условие (1) не выполняется, то «изотермические» кривые текучести (см. рис. 3) корректируются и моделирование повторяется. Расчеты в конечно-элементной программе выполняют до тех пор, пока условие (1) не будет удовлетворено для всех температурно-скоростных условий деформирования.

Каждый расчет включал моделирование осадки образца сплава В95 (рис. 4) для 9-ти температурно-скоростных условий деформирования в эксперименте:

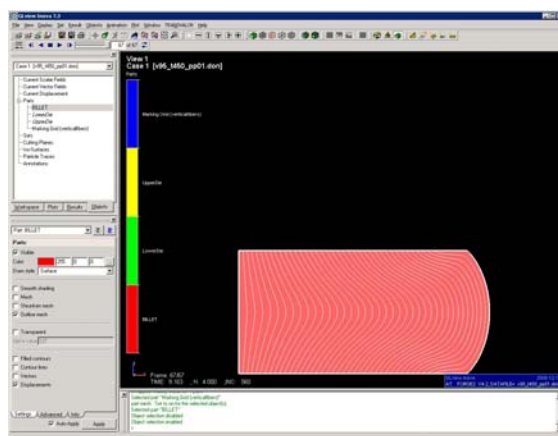
- 1) температура деформирования T_i – 350 °С, 430 °С, 450 °С;
- 2) скорость деформации $\dot{\epsilon}_i$ – 0,1 с⁻¹; 1,0 с⁻¹; 10,0 с⁻¹.



Образец
перед
началом
деформации



Образец
после
деформации
на 21 %



Образец
после
деформации
на 60 %

Рис. 4. Конечно-элементная модель образца сплава В95 в системе «Forge-2007»

В результате каждого расчета и для каждого сочетания температурно-скоростных параметров выполнялась проверка по критерию (1). На рисунке 5 показаны типовые результаты этой проверки:

- 1) сравнение экспериментального и расчетного графиков зависимости «сила деформирования» – «время» (рис. 5, а);
- 2) относительная погрешность измерений (рис. 5, б); 3) корреляция между экспериментальным и расчетным значением силы деформирования $P_{деф}$ (рис. 5, в).

Эти результаты соответствуют температуре деформирования $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ и постоянной в процессе сжатия образца скорости деформации и равной $0,1\text{ с}^{-1}$. Подобные данные получены и для остальных сочетаний температуры T_i и скорости деформации $\dot{\epsilon}_i$. В общем, отклонение расчетных индикаторных диаграмм от экспериментальных диаграмм не превышает $\pm 1,25\%$.

Корреляция между двумя переменными предполагает, что рассматриваемые переменные измерены в одном и том же диапазоне (см. рис. 5, в). Корреляция считается высокой,

если на графике зависимость между переменными близка к линии идеальной регрессии (диагональ на графике) либо совпадает с ней. На рис. 6 показаны «изотермические» кривые текучести, полученные после корректировки кривых текучести по результатам КЭМ.

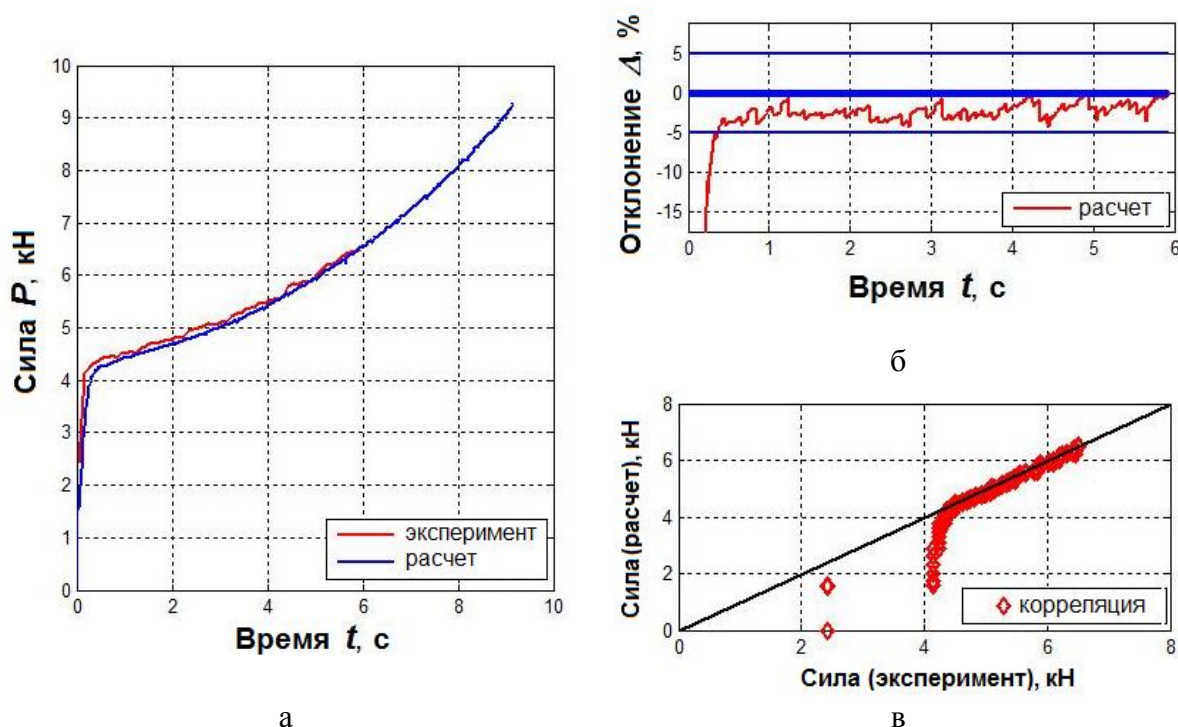


Рис. 5. Результаты моделирования осадки образца сплава В95 в системе «Forge-2007»: а – сравнение индикаторных диаграмм; б – относительная погрешность; в – корреляция между экспериментальными и расчетными значениями силы $P_{деф}$

Представленные на рис. 6 кривые являются исходными данными для построения математической модели сопротивления деформации сплава В95 в диапазоне температур 350–450 °С и диапазоне скоростей деформаций 0,1–10,0 c^{-1} .

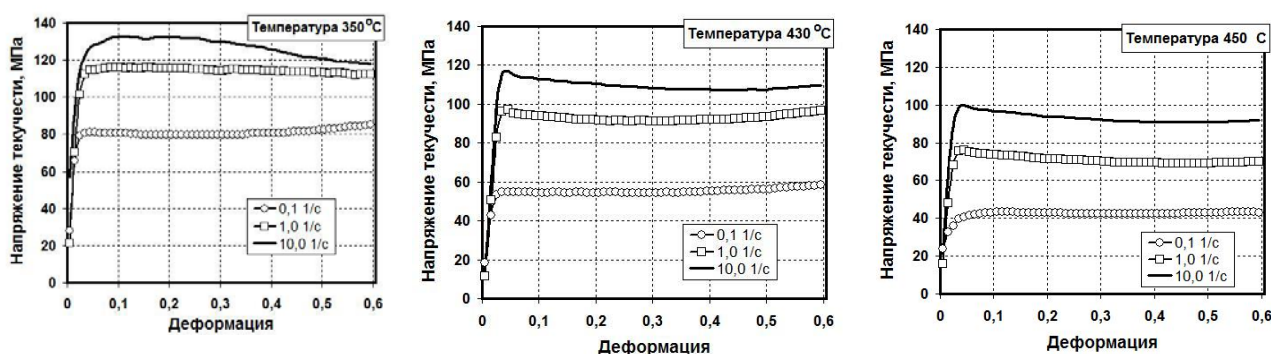


Рис. 6. «Изотермические» кривые текучести с учетом КЭМ

Полученные кривые (рис. 6) могут быть использованы:

- 1) для численного анализа технологических процессов объемной штамповки алюминиевого сплава В95, деформируемого в интервале температур от 350 до 450 °С с скоростью деформации от 0,1 c^{-1} до 10,0 c^{-1} ;
- 2) для построения математической модели сопротивления сплава В95 пластической деформации в температурно-скоростных условиях, указанных в п. 1;
- 3) при построении математической модели сопротивления сплава В95 деформации может быть выбрана одна из следующих моделей:

– эмпирическая модель, предложенная Хензелем-Шпиттелем [6] и устанавливающая связь между напряжением текучести σ_i и термомеханическими параметрами:

$$\sigma_i = A \exp(m_1 T) T^{m_9} \varepsilon_i^{m_2} \exp(m_4 / \varepsilon_i) (1 + \varepsilon_i)^{m_5 T} \exp(m_7 \varepsilon_i) \dot{\varepsilon}_i^{m_3} \dot{\varepsilon}_i^{m_8 T}, \quad (2)$$

где $A, C, m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_7, m_8, m_9$ – коэффициенты.

– феноменологическая модель, учитывающая развитие в деформируемом металле процессов упрочнения и разупрочнения при температурах горячего деформирования алюминиевых сплавов [7]:

$$d\sigma_i = d\sigma_{i1} + d\sigma_{i2}; \quad (3)$$

$$d\sigma_{i1} = \frac{\partial \sigma_{i1}}{\partial \varepsilon_i} d\varepsilon_i = -\frac{1}{n} (\sigma_s - \sigma_i) \dot{\varepsilon}_i(t) dt; \quad d\sigma_{i2} = \frac{\partial \sigma_{i2}}{\partial t} dt = (\sigma_i - \sigma_0) \frac{0.3 \dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_p t_p} dt, \quad (4)$$

где σ_s – напряжение текучести, соответствующее началу разупрочнения; σ_n – напряжение текучести, соответствующее началу разупрочнения; σ_0^s – напряжение текучести, соответствующее установившемуся течению, достигнутому к моменту времени t в результате разупрочнения; ε_p – деформация, соответствующая пику напряжения текучести; $\dot{\varepsilon}_i$ – скорость деформации.

ВЫВОДЫ

Рассмотрен один из возможных методических подходов к построению «изотермической» кривой текучести алюминиевого сплава В95, деформируемого при повышенных температурах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект РНП-2.2.2.3.8179) и Немецкой службы академических обменов (ДААД) (программа «Михаил Ломоносов – II»).

ЛИТЕРАТУРА

1. Szeliga D. Inverse analysis for identification of rheological and friction models in metal forming / D. Szeliga, J. Gawad, M. Pietrzyk // *Computer methods in applied mechanics and engineering* – 2006. – № 195. – P. 6778–6798.
2. Characterization and Modelling of High Temperature Flow Behavior of Aluminum Alloy 2024 / P. L. Charpentier, B. C. Stone, S. C. Ernst, J. R. Thomas // *Met. Trans. A.* – 1986. – № 17. – P. 2227–2237.
3. The influence of transient strain-rate deformation conditions on the deformed microstructure of aluminium alloy Al-1% / G. J. Baxter, T. Furu, Q. Zhu, J. A. Whiteman, C. M. Sellars // *Mg. Acta Mater.* – 1999. – № 47 (8). – P. 2367–2376.
4. Effect of Changing Strain Rate on Flow Stress during Hot Deformation of Type 316L Stainless Steel / M. F. Abbod, C. M. Sellars, A. Tanaka, D. A. Linkens, M. Mahfouf // *Materials Science and Engineering.* – 2008. – A. 491. – P. 290–296.
5. Петров П. А. К вопросу построения «изотермической» кривой текучести алюминиевого сплава АК4-1 / П. А. Петров // *Обработка материалов давлением : сборник научных трудов : Краматорск, 2009.* – № 2 (21). – С. 135–140.
6. *Руководство пользователя системы Forge 2007.* – Transvalor, 2007.
7. Petrov P. Analysis of rheological behavior of Al-Cu-Mg-Fe-Ni alloy at elevated temperatures using phenomenological flow stress model / P. Petrov, M. Abbod // *International Journal of Material Forming.* – 2009. – Vol. 2, Suppl 1. – P. 371–374.

Петров П. А. – канд. техн. наук, доц. МГТУ «МАМИ».

МГТУ «МАМИ» – Московский государственный технический университет «МАМИ», г. Москва, Россия.

E-mail: petrov_p@mail.ru