

УДК 620.178.6

В. Н. Фам, аспирант, **П. А. Петров**, канд. техн. наук, доцент
Московский Политех, г. Москва, Россия
Тел./Факс: +79036870398; E-mail: petrov_p@mail.ru

ПОСТРОЕНИЕ КРИВЫХ ТЕКУЧЕСТИ СПЛАВА АМГ6 С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ПОСТАНОВКИ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ

В данной работе рассмотрен подход к построению «изотермической» кривой текучести алюминиевого сплава АМг6 на основе метода испытания сжатием и постановки обратной задачи. Обратная задача решена с применением компьютерной программы QFORM. Определен температурно-скоростной диапазон для исследования напряжения текучести, а также определены условия подготовки исходных данных и критерий оценки точности результатов натурного и виртуального экспериментов. В результате получены «изотермические» кривые текучести в диапазоне температур от 20 до 450 °С достаточные для применения при компьютерном моделировании технологий горячей штамповки алюминиевого сплава АМг6, в том числе выполняемых в условиях близких к изотермическим.

Ключевые слова: кривая текучести, алюминиевый сплав, компьютерное имитационное моделирование, горячая изотермическая штамповка, QFORM, постановка обратной задачи.

V. N. Fam, P. A. Petrov

CONSTRUCTION OF FLOW CURVES FOR AMG6 ALLOY USING THE INVERSE TECHNIQUE

The present paper describes the approach of the isothermal flow stress-strain curves design based on the axisymmetric compression test and inverse technique. The inverse technique is realized with computational simulation code QFORM. The temperature and the strain rate range as well as the initial date and the criteria of the output date accuracy were identified for the research into the flow stress behaviour. As the result, the isothermal flow stress-strain curves were obtained within the temperature range of 20-450 °C. The obtained data could be used for the computational simulation of the technologies of hot forging of AlMg6 alloy, viz. the hot isothermal forging processes of the mentioned alloy.

Keywords: flow stress-strain curve, aluminium alloy, computational simulation of forming, isothermal forging, QFORM, inverse technique.

При постановке задачи, направленной на компьютерное моделирование процессов ОМД важнейшими входными данными, характеризующими деформируемый материал, является зависимость напряжения текучести от накопленной деформации, скорости деформации и температуры. Для получения «изотермических» кривых текучести необходимо провести механические испытания исследуемого материала, результатом которых является получение индикаторных диаграмм в координатах "перемещение инструмента - сила деформирования" или "время – сила деформирования" для различных скоростей деформации и температур. Под термином «изотермическая кривая» понимается кривая текучести, отражающая процесс нагружения образца исследуемого материала при постоянной температуре нагрева и постоянной скорости деформации. Скорость деформации, так же как и температура, остается постоянной на протяжении всего процесса нагружения.

Целью данной статьи является построение «изотермической» кривой текучести алюминиевого сплава АМг6 при различных температурно-скоростных условиях его деформирования.

Сплав АМг6 относится к категории деформируемых алюминиевых сплавов. Его преимуществом является низкий удельный вес, коррозионная стойкость и высокая пластичность [1]. Химический состав сплава АМг6 представлен в таблице 1.

Таблица 1. – Результат анализа химического состава сплава АМг6, вес. %

Химический элемент	Al	Mg	Mn	Fe	Si	Ti	Cu
Содержание, %	93,27	5,84	0,57	0,26	0,13	0,03	0,04

Механические испытания алюминиевого сплава АМг6 проводили на испытательных машинах моделей LFM50 и LFM250. Исходные цилиндрические образцы имели размеры: диаметр 10 мм, высота 10 мм. Каждый образец исследуемого сплава подвергался сжатию на 50% от его исходной высоты. Для обеспечения постоянства температуры образца во время проведения эксперимента производили осадку в условиях близких к изотермическим. Оговоримся, что 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, рассчитываемые по индикаторным диаграммам, должны быть скорректированы на величину изменения напряжения текучести из-за теплового эффекта пластической деформации и на величину изменения напряжения текучести, обусловленного влиянием контактного трения [4, 5, 8].

Образцы осаживались при постоянной скорости деформации, что оказывается возможным при применении испытательных машин LFM50 и LFM250. Для обеспечения нагружения образцов с постоянной скоростью деформации, были рассчитаны значения перемещения траверсы испытательной машины, соответствующие текущей высоте образца, по нижеследующей формуле [2]:

$$S_i = H_0 - \exp(-\dot{\epsilon}_i \times t) \times H_0, \quad (1)$$

где S_i – перемещение траверсы испытательной машины; $\dot{\epsilon}_i$ – скорость деформации; t – время; H_0 – исходная высота образца.

Расчет скорости деформирования на каждом этапе нагружения выполнялся с помощью формулы [3]:

$$V_i = \exp(-\dot{\epsilon}_i \times t) \times H_0 \times \dot{\epsilon}_i, \quad (2)$$

где V_i – скорость перемещения траверсы испытательной машины; $\dot{\epsilon}_i$ – скорость деформации; t – время; H_0 – исходная высота образца

Испытания проводились при температурах 20°C, 300°C, 400°C и 450°C, со скоростями деформации 0,001 с⁻¹, 0,01 с⁻¹ и 0,4 с⁻¹. Каждый образец исследуемого сплава подвергался сжатию на 50% от его исходной высоты. Сжатие образцов выполнялось без смазки. Выбор температуры нагрева основан на известных характерных температурах деформирования исследуемого сплава в условиях холодной, теплой (полугорячей) и горячей деформации; выбор скорости деформации – с учетом типовых значений, характерных для штамповки на гидравлических и механических прессах. На рис. 1 представлены индикаторные диаграммы, полученные в результате образцов сплава АМг6 в исследуемом диапазоне температур и скоростей деформации.

По результатам эксперимента рассчитывали зависимость напряжения текучести от накопленной деформации по выражениям:

$$\sigma_i = \frac{P_i}{F_i}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_i = \ln \frac{H_i}{H_0}, \tag{4}$$

где P_i – текущее значение силы деформирования; F_i – текущее значение площади поперечного сечения образца; H_i – текущее значение высоты образца; H_0 – начальная высота образца.

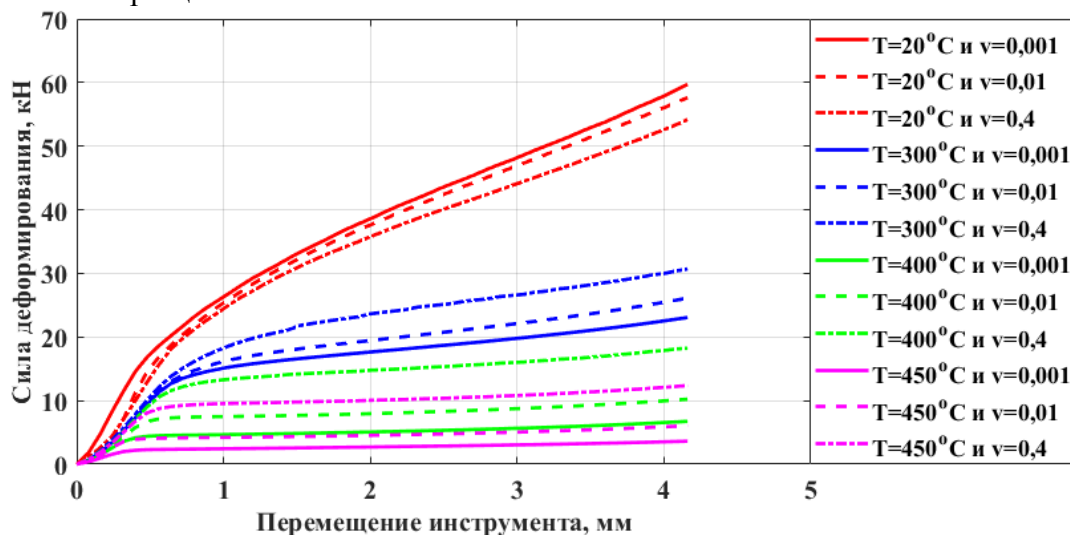


Рисунок 1. Индикаторная диаграмма, полученная при сжатии образцов сплава

На рис. 2 представлен алгоритм расчета «изотермической» кривой текучести сплава АМг6. Полученные кривые текучести (см. рис. 3) обеспечивают достаточную сходимость результатов моделирования с реальным процессом осадки образцов (сравнение экспериментальных и расчетных кривых показывает, что средняя ошибка не превышает 5 – 10%), следовательно, могут быть использованы для моделирования технологических операций холодной, теплой и горячей штамповки.



Рисунок 2. Схема построения «изотермической» кривой текучести сплава АМг6

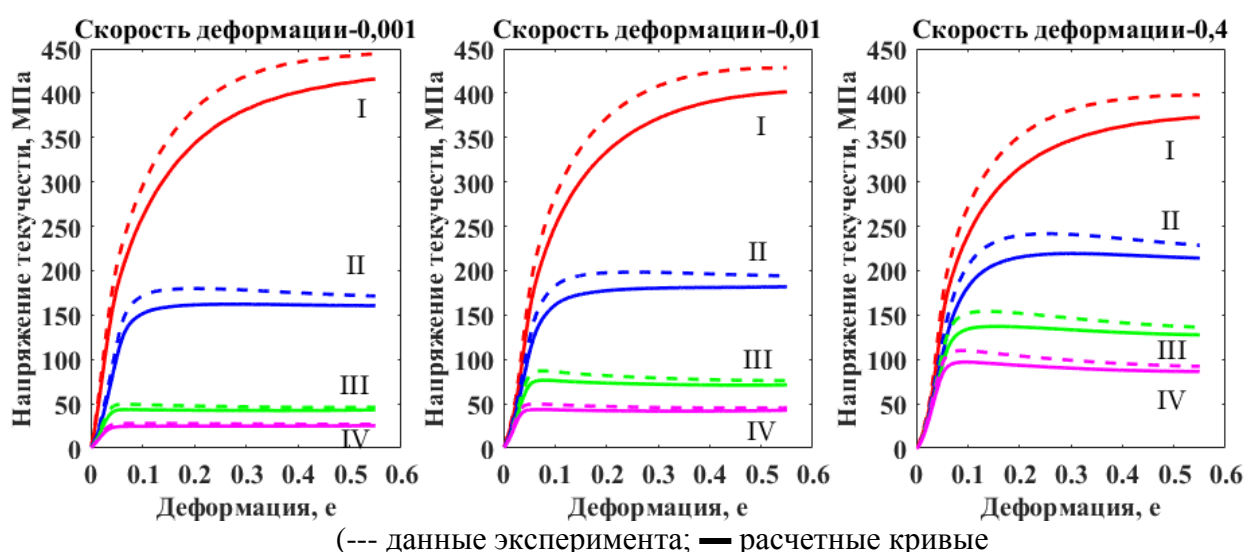
Выполнить проверку «изотермической» кривой текучести сплава оказывается возможным по результатам компьютерного конечно-элементного моделирования

(КЭМ) натурального испытания цилиндрического образца сжатием. Критерий оценки точности моделирования:

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

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

Если условие (5) не выполняется, то полученные по схеме (см. рис. 2) кривые текучести корректируются и моделирование повторяется. Расчеты в конечно-элементной программе выполняют до тех пор, пока условие (5) не будет удовлетворено для всех температурно-скоростных условий деформирования: температура деформирования T_i – 20 °С, 300 °С, 400 °С, 450 °С; скорость деформации $\dot{\epsilon}_i$ – 0,001 с⁻¹; 0,01 с⁻¹; 0,4 с⁻¹.



(--- данные эксперимента; — расчетные кривые
 I – 20 градусов; II – 300 градусов; III – 400 градусов; IV – 450 градусов)
 Рисунок 3. Сравнение экспериментальных и расчетных напряжений текучести при осадке образцов с различными скоростями

Для корректного воспроизведения эксперимента в программе QFORM 2D, как, впрочем, и в любой системе, имитирующей ОМД-процессы, необходимо задать правильно начальные условия расчета, данные о сопротивлении материала заготовки пластической деформации, что позволит получить результат, не искаженный погрешностью, вызванной неточностью данных о свойствах материала и условиях деформационного процесса [9].

На рис. 4 показаны типовые результаты этой проверки после выполнения цикла корректировки методом постановки обратной задачи: 1) сравнение экспериментального и расчетного графиков зависимости «сила деформирования» – «ход» (рис. 4а); 2) относительная погрешность измерений (рис. 4б); 3) корреляция между экспериментальным и расчетным значением силы деформирования $P_{деф}$ (рис. 4в). Эти результаты соответствуют температуре деформирования 300°С. Подобные данные получены и для остальных сочетаний температуры T_i и скорости деформации. В общем, отклонение расчетных индикаторных диаграмм от экспериментальных диаграмм не превышает $\pm 1,25\%$.

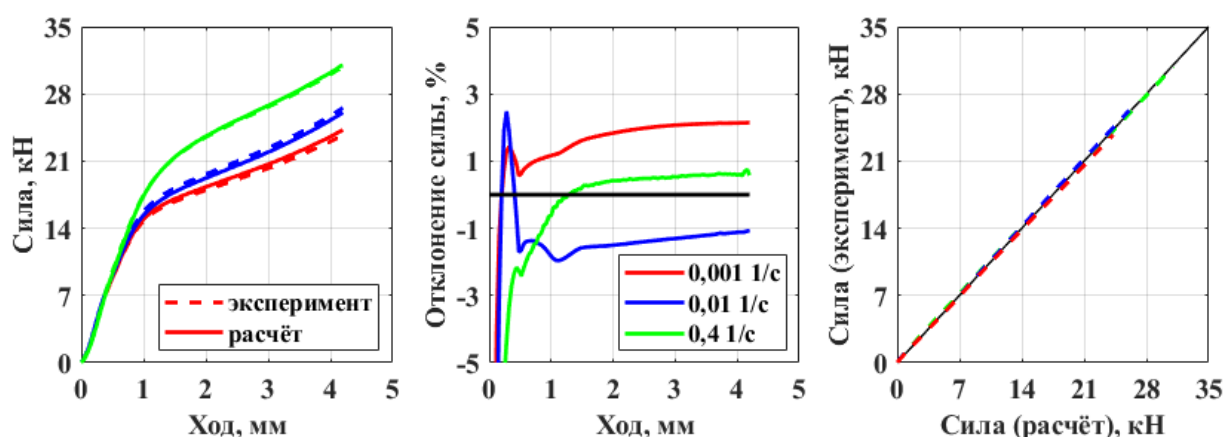


Рисунок 4. Результаты моделирования осадки образца сплава АМг6

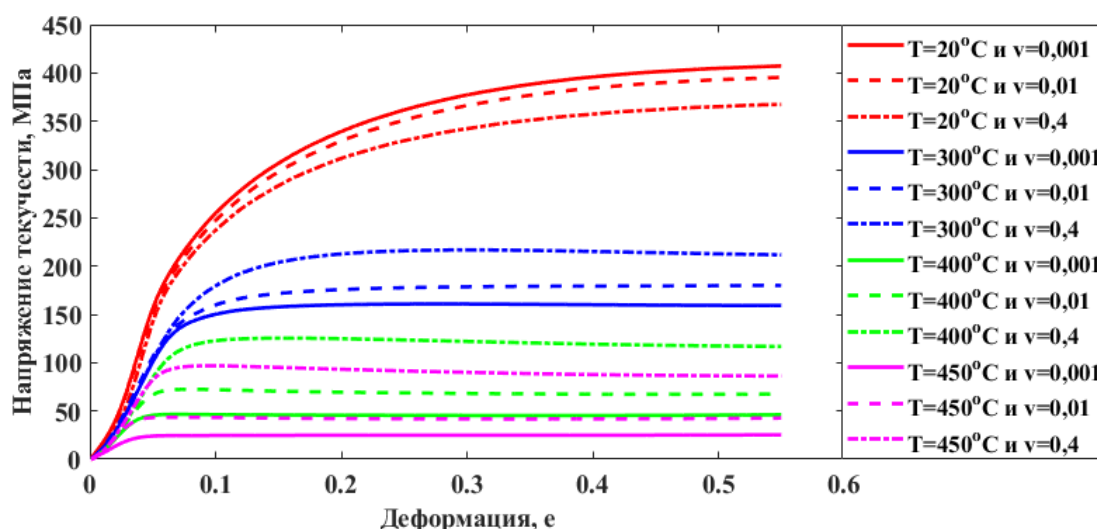


Рисунок 5. «Изотермические» кривые с учетом КЭМ.

Вывод и рекомендации

Полученные «изотермические» кривые (рис. 5) могут быть использованы:

1) для численного анализа технологических процессов объемной штамповки алюминиевого сплава АМг6, деформируемого в интервале температур от 20 до 450°С со скоростью деформации от 0,001 с⁻¹ до 0,4 с⁻¹;

2) для построения математической модели сопротивления сплава АМг6 пластической деформации необходимо выбрать структуру модели;

3) основываясь на полученных результатах, построена модель напряжения текучести в широком температурно-скоростном диапазоне, указанном в п.1 [6];

4) при температуре 20°С проявляется anomalous change in flow stress with strain rate (см. рис. 5). Данное anomalous behavior in some way reminds the effect, which was pointed out by S. I. Gubkin [7] – «flow band», used by him for determination of a single curve. In the opinion of Gubkin «flow band» includes curves of hardening, taking into account anisotropy of mechanical properties, and curves of hardening for different types of stressed states. In our case, curves are obtained from the results of compression tests and do not include different types of stressed states. However, the strain rate changes by two orders of magnitude, which, possibly, leads to anomalous restructuring of the microstructure of the studied

сплава. Данная гипотеза требует дополнительной проверки. Разброс значений напряжения текучести при температуре 20°C не превышает 9,26% от максимального значения σ_i , например, полученного при скорости деформации 0,001 с⁻¹.

Данная работа является частью совместного российско-индийского проекта «Экспериментальные и численные исследования контактного трения в процессе пластической деформации сжатием с кручением». Работа финансируется Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ) и Департаментом науки и технологий (ДНТ) по исследовательскому проекту № 19-58-45020\19 и гранту INT/RUS/RFBR/388.

ЛИТЕРАТУРА:

1. ГОСТ 4784-97. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Принят межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол n 12 от 21 ноября 1997 г.). – Введ. 2000-07-01.
2. Петров, П. А. Методика исследования сопротивления деформации при двухэтапном монотонном нагружении / Петров П. А. // Известия ТулГУ. Технические науки. – Москва, 2019. – Вып. 5. – С. 157-174.
3. Воронков, В. И. Определение кривых текучести материалов с применением компьютерного моделирования / Воронков В. И., Потапенко К. Е. // 77-й международной научно-технической конференции «автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», 2012. – С. 115-124.
4. Szeliga D. Inverse analysis for identification of rheological and friction models in metal forming / Szeliga D., Gawad J., Pietrzyk M. // Computer methods in applied mechanics and engineering, 2006. – № 195. –P. 6778–6798.
5. Charpentier P.L. Characterization and Modelling of High Temperature Flow Behavior of Aluminum Alloy 2024. / Charpentier P.L., Stone B.C., Ernst S.C., Thomas J.R. – M: Met.Trans. A, 17, 1986. – С. 2227-2237.
6. Петров, П. А. Построение «изотермической» кривой текучести алюминиевого сплава В95. / Петров П. А. // Обработка материалов давлением. – № 2(23), 2010. – С. 88-93.
7. Губкин, С. И. Пластическая деформация металлов Т. 2. / Губкин С. И. – М.: Металлургиздат, 1961. – 416 с. – ISBN ССА 175/БН2-30082017/14.
8. Mohd Kaswande Razali. A new approach of predicting dynamic recrystallization using directly a flow stress model and its application to medium Mn steel / Mohd Kaswande Razali, Man Soo Joun // Journal of Materials Research and Technology Volume 11, March–April 2021, Pages 1881-1894.
9. Xiao H. Flow stress correction for hot compression of titanium alloys considering temperature gradient induced heterogeneous deformation. / H. Xiao, X.G. Fan, M. Zhan, B.C. Liu, Z.Q. Zhang // Journal of Materials Processing Tech., Volume 288, February 2021, 116868.

Поступила в редколлегию 31.03.2021 г.