

## ВЫБОР МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Mg

*Петров П.А., Фам Ван Нгок*

*Московский политехнический университет, Москва*

**Ключевые слова:** система Al-Mg, алюминиевый сплав, кривая текучести, напряжение текучести, база данных материалов, математическая модель.

**Аннотация.** В данной работе определена в явном виде математическая модель для четырех алюминиевых сплавов системы Al-Mg в диапазоне температур 20-450°C, скорости деформации 0,001-0,4 с<sup>-1</sup>. Показано область применения данной модели и её ограничения; представлены рекомендации о применимости модели для компьютерного имитационного моделирования процесса комбинированного выдавливания в изотермических условиях.

## THE CHOICE OF A MATHEMATICAL FUNCTION TO DESCRIBE THE DEFORMATION RESISTANCE OF ALUMINUM ALLOYS OF THE Al-Mg SYSTEM

*Petrov P.A., Pham Van Ngoc*

*Moscow Polytechnic University, Moscow*

**Keywords:** Al-Mg system, aluminum alloy, yield curve, yield stress, material database, mathematical model.

**Abstract.** In this work, a mathematical model is explicitly defined for four aluminum alloys of the Al-Mg system in the temperature range 20-450°C, strain rate 0,001-0,4 s<sup>-1</sup>. The scope of this model and its limitations are shown; recommendations on the applicability of the model for computer simulation of the process of combined extrusion under isothermal conditions are presented.

В качестве исследуемого материала рассматриваются сплавы системы Al-Mg (магналий): AMg2, AMg3, AMg5, AMg6. Сплавы системы Al-Mg (<6% Mg) имеют сравнительно небольшую прочность и практически не упрочняются термической обработкой [1]. Зарождение дисперсных выделений (зон Гинье Престона и промежуточных фаз) в сплавах Al-Mg, содержащих <6% Mg, затруднено. Распад обычно проходит гетерогенно с возникновением сравнительно небольшого количества грубых включений [2].

При определении математической модели напряжения текучести сплавов для её последующего применения в программах компьютерного имитационного моделирования часто применяют математическую зависимость, предложенную Хензелем – Шпиттелем [3]. В этой модели девять неизвестных коэффициентов; модель представляет собой функцию трёх переменных: температуры, деформации и скорости деформации. В общем виде математическая модель может быть представлена в виде:

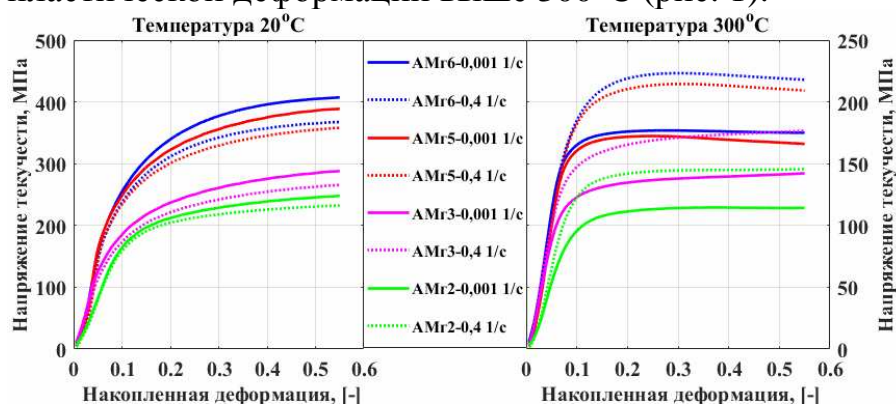
$$\sigma_i = m_1 \cdot e^{m_2 T} \cdot \varepsilon_i^{m_3} \cdot \dot{\varepsilon}_i^{m_4} \cdot e^{m_5 / \varepsilon_i} \cdot (1 + \varepsilon_i)^{m_6 T} \cdot e^{m_7 \varepsilon_i} \cdot \dot{\varepsilon}_i^{m_8 T} \cdot T^{m_9}, \quad (1)$$

где  $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6, m_7, m_8, m_9$  – коэффициенты;  $\sigma_i$  – интенсивность напряжения;  $\dot{\varepsilon}_i$  – скорость деформации;  $\varepsilon_i$  – истинная (накопленная) деформация;  $T$  – температура.

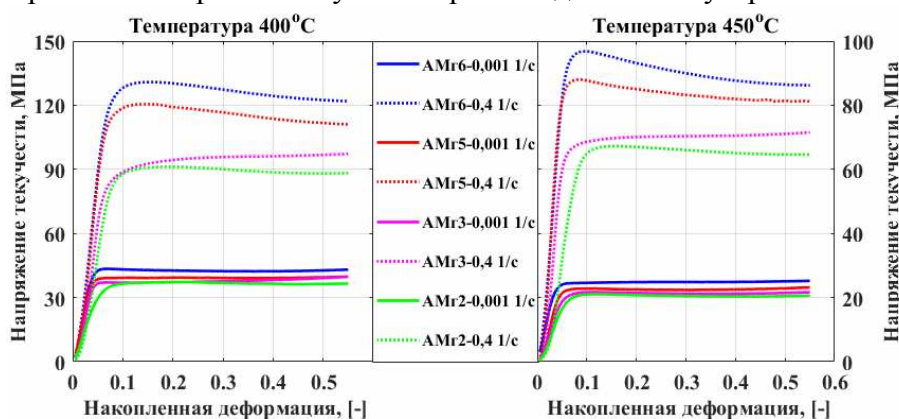
Для сплавов АМг2, АМг3, АМг5, АМг6 определены модели сопротивления деформации в явном виде – найдены на основе решения задачи об оптимизации неизвестные коэффициенты зависимости (1) в диапазоне температуры 20-450°C и скорости деформации 0,001-0,4 с<sup>-1</sup>.

Особенностями формулы (1) являются: 1) возможность описания любого характера изменения напряжения текучести в зависимости от сочетания трёх аргументов, что позволяет описать изменение  $\sigma_i$  за счет упрочнения материала либо упрочнения-разупрочнения материала; 2) функция (1) имеет два экстремума. Вторая особенность накладывает некоторые ограничения на выбор области определения для каждого из аргументов в формуле (1) так, чтобы обеспечить адекватное описание поведения пластически деформируемого материала.

Первый экстремум функции совпадает с её перегибом и проявляется не у всех материалов либо не при любом сочетании аргументов. В частности, для рассматриваемых в данной работе материалов – алюминиевых сплавов системы Al-Mg – в диапазоне значений деформации от 0 до 0,55 имеется перегиб при температуре пластической деформации выше 300°C (рис. 1).



а) Изотермические кривые текучести при холодной и полугорячей температуре



б) Изотермические кривые текучести при горячей температуре

Рис. 1. Кривые текучести сплавов системы Al-Mg (АМг2, АМг3, АМг5, АМг6)

Рассматривая процесс пластической деформации материала в очаге деформации, значение накопленной деформации в материальной точке может

быть более 0,55. Например, при комбинированном выдавливании алюминиевого сплава АМг6 (рис. 2) величина накопленной деформации достигает значения 10.

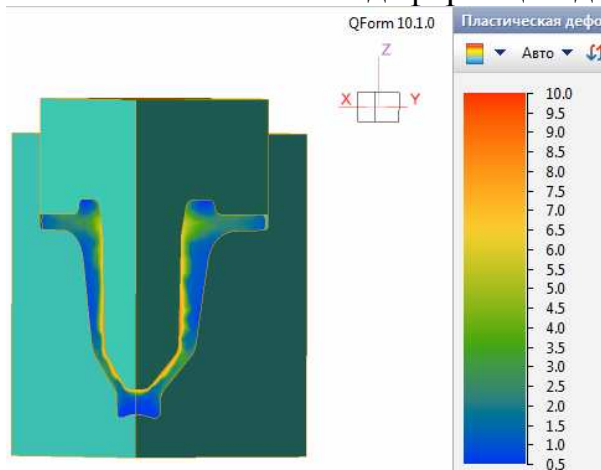


Рис. 2. Распределение деформации в очаге деформации при комбинированном выдавливании сплава АМг6 при температуре 430°C

При значении накопленной деформации более 1,2 на кривой текучести, описываемой моделью (1), появляется второй экстремум – минимум (рис. 3). При последующем увеличении накопленной деформации наблюдается монотонное увеличение сопротивления деформации, что нарушает известные представления о сопротивлении деформации [4-5].

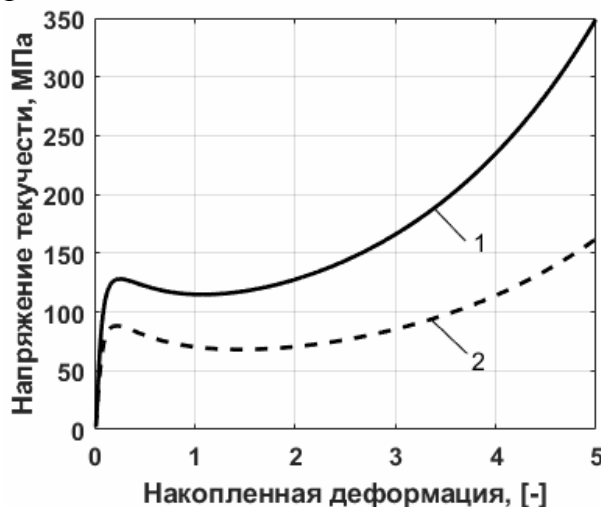


Рис. 3. Кривые текучести сплава АМг6 в диапазоне деформации от 0 до 5 при температуре выше 300°C: 1 – 350°C; 2 – 450°C

Исходя из особенностей формулы (1) могут быть сформулированы ограничения и рекомендации о применении полученной модели сопротивления деформации алюминиевых сплавов системы Al-Mg для компьютерного имитационного моделирования процессов обработки давлением, например, процессов комбинированного выдавливания в изотермических условиях.

### Выводы и рекомендации

Модель сопротивления деформации (1) определенная в явном виде для сплавов АМг2, АМг3, АМг5, АМг6 применима для диапазона деформации от 0 до 1,2; температур от 20 до 450°C и скорости деформации от 0,001 до 0,4 с<sup>-1</sup>, и может быть применена для компьютерного имитационного моделирования

процессов обработки давлением данных сплавов, например, комбинированного выдавливания в изотермических условиях. Максимальное значение деформации  $\varepsilon_{\max}$  из области определения модели (1) зависит от температуры и скорости деформации.

В случае, если при выполнении компьютерного имитационного моделирования текущее значение деформации превышает максимальное значение из области определения, дальнейший расчет напряжения текучести производится с учетом значения напряжения при  $\varepsilon_{\max}$ .

#### Список литературы

1. Тихомиров А.В., Аксенов А.А., Калошкин С.Д., Шелехов Е.В. Особенности формирования структуры и свойства сплавов системы Al-Mg, механически легированных карбидом кремния // *Материаловедение*. 2006. №11. С. 5-12.
2. Obaisi A.M., Danaf E.A., Ragab A.E., Soliman M.S., Alhazaa A.N. Statistical Model for the Mechanical Properties of Al-Cu-Mg-Ag Alloys at High Temperatures // *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2017, Article ID 1691465, 13 pages, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/1691465>
3. Rostislav Kawulok, Petr Opěla, Ivo Schindler, Petr Kawulok. Model of hot deformation resistance of the iron aluminide of the type Fe-40at.% Al // *Metal*, 15. - 17. 5. 2013.
4. Mavlyutov A.M., Orlova T.S., Latynina T.A., Kasatkin I.A., Murashkin M.Yu., Valiev R.Z. Influence of additional deformation on microstructure, mechanical and electrical properties of Al-Mg-Si alloy processed by high pressure torsion // *Reviews on advanced materials science*. 2017. Vol. 52, Iss. 1-2. P. 61-69.
5. Mogucheva A.A., Kaibyshev R.O. Structure and properties of aluminum alloy 1421 after equal-channel angular pressing and isothermal rolling // *The Physics of Metals and Metallography*. 2008. Vol. 106. № 4. P. 424-433.

#### Сведения об авторах:

*Петров Павел Александрович* – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии»;

*Фам Ван Нгок* – аспирант.