

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ  
ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ДИНАМИКУ  
ИСКУССТВЕННОГО СТАРЕНИЯЕвгений Чумаков<sup>1</sup>, Сандугаш Шукбарова<sup>2</sup>, Ирмантас Гедзевичус<sup>3</sup>, Юстинас Гаргасас<sup>4</sup><sup>1, 2</sup>Казахский национальный технический университет имени К. И. Сатпаева, Алматы, Казахстан<sup>3, 4</sup>Вильнюсский технический университет имени Гедиминаса, Вильнюс, ЛитваЭл. почта: <sup>1</sup>chumakov ev@mail.ru; <sup>2</sup>sandugash shukbarova@list.ru;<sup>3</sup>irmantas.gedzevicius@vgtu.lt; <sup>4</sup>justinas.gargasas@vgtu.lt

**Резюме.** В настоящее время повышение качества продукции машиностроительных предприятий связывают с внедрением новых материалов и технологий. Широкое распространение во всех отраслях машиностроения получили алюминиевые сплавы. В настоящей работе приведены результаты исследований алюминиевого сплава АД31. Алюминиевый сплав АД31 относится к деформируемым стареющим сплавам. Интенсивность процессов старения, протекающих в материале после его кристаллизации, зависит от ряда условий, таких как: градиент температур при кристаллизации по объему заготовки, температура перегрева расплава, время его выдержки, скорость разлива и кристаллизации.

**Ключевые слова:** пластическая деформация, термообработка, искусственное старение.

**Введение**

Пластическая деформация при производстве профилей различного назначения методом прямого пресования (экструзии) через матрицу бывает разной и зависит от типа изделия и формы очага деформации. Следовательно, разными будут и сформированные в процессе производства внутренние напряжения. Технология изготовления указанных изделий на заключительном этапе предусматривает термообработку – искусственное старение. При этом температура и время выдержки в печи для разных изделий практически одинаковы. Однако хорошо известно, что внутренние напряжения оказывают существенное влияние на скорость и глубину протекания процессов, приводящих к перестройке микроструктуры. Отсюда следует предположить, что одинаковый режим искусственного старения для профилей с разными внутренними напряжениями приведет к разным результатам. Другими словами, эффект старения разных изделий при неизменном режиме будет разным. Однако для практики важным является получение изделий с необходимыми механическими свойствами. Для этого нужны знания о влиянии на них величины деформации, температуры и времени выдержки в печи (Машеков и др. 2009; Чумаков и др. 2009; Чумаков, Жансеркеева 2007, 2008). В данной работе проводились исследования влияния величины пластической деформации на динамику искусственного старения.

**Область исследования**

Исследования проводились на образцах, которые поэтапно изготавливались из предварительно вырезанных фрагментов литого алюминиевого прутка (рис. 1).

Искусственное старение проводилось при температуре 200 °С. Образцы в разном состоянии испытывались в условиях одноосного растяжения на универсальной экспериментальной установке (Чумаков, Жансеркеева 2007). По результатам каждого испытания строилась диаграмма растяжения, после предварительной деформации сжатия равной 2,5 %, и последующего старения при температуре 200 °С в течение 8 часов, одна из которых приведена на рис. 2.

Результаты обработки графиков приведены в таблице 1.



Рис. 1. Образец для механических испытаний на растяжение

1 pav. Tempimo bandymo bandinys

Fig. 1. Sample of mechanical tensile test

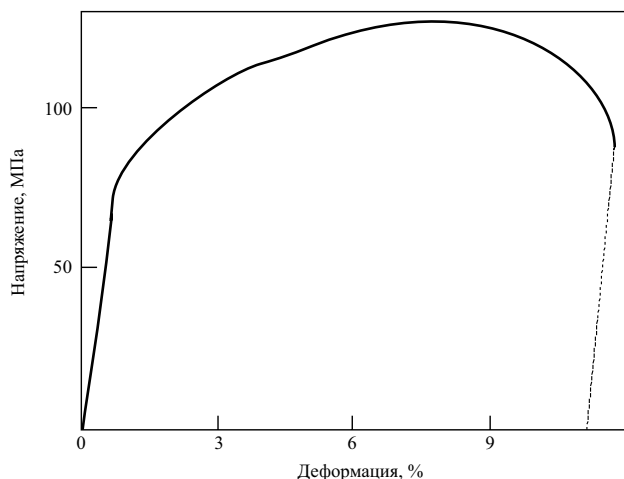


Рис. 2. Диаграмма растяжения образца № 3 алюминиевого сплава АД31

2 pav. Aliuminio lydinio AD31 Nr. 3 bandinio tempimo diagrama

Fig. 2. Stress-strain diagram of aluminum sample No 3

Таблица 1. Результаты обработки диаграмм растяжения 1 lentelė. Tempimo diagramų apdorojimo rezultatai  
Table 1. Processing results of stress-strain diagrams

№	$\epsilon_{сж}$ , %	$\sigma_{02}$ , МПа	$\sigma_{\theta}$ , МПа	$\epsilon_p$ , %
1	2,5	71,6	125,0	11,2
2	2,8	71,8	125,0	11,0
3	3,7	73,3	126,0	10,1
4	4,6	76,6	128,1	9,4
5	8,7	80,3	130,0	8,2
6	11,3	81,2	132,1	7,7
7	15,7	83,2	134,7	7,1

Здесь  $\epsilon_{сж}$  – предварительная деформация сжатия,  $\sigma_{02}$  – предел текучести,  $\sigma_{\theta}$  – временное сопротивление,  $\epsilon_p$  – запас пластичности при растяжении.

Следует еще раз отметить, что кристаллизация заготовок из деформируемого алюминиевого сплава протекает при больших скоростях и градиентах температур, что приводит к значительным различиям в величинах внутренних напряжений по объему.

В начале работы было сделано предположение, что неравновесность структуры и неравномерное распределение внутренних напряжений не могут быть полностью ликвидированы термической обработкой. Результаты таблицы 1 подтверждают верность такого утверждения. Графическое доказательство этого утверждения для алюминиевого сплава АД31 после искусственного старения при 200 °С в течение 8 часов представлено на рисунках 3–5.

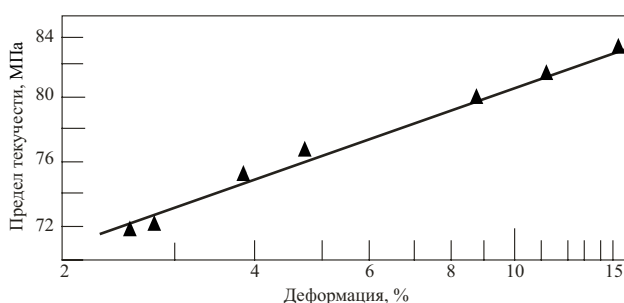


Рис. 3. Зависимость предела текучести от накопленной пластической деформации сплава

3 pav. Takumo ribos priklausomybė nuo plastinės deformacijos  
Fig. 3. Yield strength dependence on plastic deformation

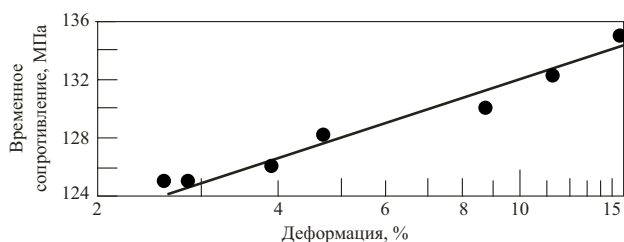


Рис. 4. Зависимость временного сопротивления алюминиевого сплава АД31 от деформации сплава

4 pav. Aliuminio lydinio AD31 laikino atsparumo priklausomybė nuo deformacijos

Fig. 4. Dependence of temporary tensile strength of an aluminum alloy AD31 on deformation

Показанные на рисунках 3–5 зависимости характеризуют качество изделий, которые в процессе производства накопили пластическую деформацию и прошли финишный этап изготовления – термообработку, искусственное старение. Графики построены в двойных логарифмических координатах и имеют вид прямых линий, на которые хорошо ложатся экспериментальные точки. В этом случае можно записать ряд математических выражений.

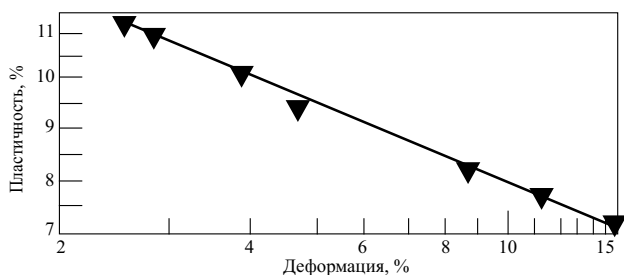


Рис. 5. Зависимость пластичности от деформации сплава  
5 pav. Plastiškumo priklausomybė nuo deformacijos

Fig. 5. Dependence of ductility on deformation

Для зависимости предела текучести от накопленной пластической деформации выражение будет иметь вид:

$$\sigma_{02} = \alpha \varepsilon^\eta, \quad (1)$$

где  $\alpha$  и  $\eta$  – коэффициенты.

Временное сопротивление и предварительная накопленная пластическая деформация связаны также степенным уравнением

$$\sigma_v = \beta \varepsilon^\lambda, \quad (2)$$

где  $\beta$  и  $\lambda$  – коэффициенты.

Для запаса пластичности справедливо уравнение

$$\dot{\varepsilon} = \gamma \varepsilon^\mu, \quad (3)$$

где  $\gamma$  и  $\mu$  – коэффициенты.

### Обсуждение результатов

Из приведенных графиков можно сделать ряд выводов. Полученные зависимости дают ответ на поставленный в задаче вопрос, касающийся механических свойств изделий после их изготовления. Неодинаковая по объему заготовки структура алюминиевого сплава, сформированная в неравновесных условиях при кристаллизации, наследуется на протяжении всех технологических операций. Готовое изделие так же, как и заготовка, обладает неодинаковой структурой. Прочностные и пластические свойства зависят от величины накопленной пластической деформации в процессе изготовления. Так, из рисунка 3 следует, что величина предела текучести растет с ростом накопленной пластической деформации. Это не противоречит существующим представлениям о влиянии деформации на структуру и свойства конструкционных материалов. Аналогично пределу текучести изменяется временное сопротивление. Видим, что в исследованном интервале  $\sigma_{02}$  изменяется от 71,6 МПа до 83,2 МПа, т. е. возрастает за счет искусственного старения на 16 %. Временное сопротивление  $\sigma_v$  также возрастает от 125 МПа до 134,7 МПа, т. е. почти на 8 %. Вместе с этим запас пластичности в процессе старения снижается с 11,2 % до 7,1 %, что составляет 36,6 %. Отсюда следует, что искусственное старение в большей степени воздействует на пластические характеристики и меньше всего на временное сопротивление.

В процессе прессования материал подвергается деформационному упрочнению, после которого на заключительном этапе производства проводится дополнительная термообработка – искусственное старение при 200 °С в течение 8 часов. Целью данной операции явля-

ется получение дополнительного упрочнения готовых изделий. Эта цель достигается, о чем свидетельствуют результаты испытаний, приведенные на рисунках 3–5.

Однако в соответствии с поставленной в работе целью необходимо отметить, что искусственное старение не приводит структуру в равновесное состояние. Неравномерное распределение внутренних напряжений, отражением которого является предел текучести, может выступать в качестве движущей силы дальнейших преобразований микроструктуры в процессе хранения изделия на складе или его эксплуатации.

Отсюда следует, что:

- в процессе прессования изделий происходит деформационное упрочнение, зависящее от величины пластической деформации, с сохранением неравновесности структуры;
- искусственное старение приводит к дополнительному упрочнению материала, величина которого также зависит от накопленной пластической деформации;
- в процессе искусственного старения алюминиевый сплав не приходит в равновесное состояние. Его микроструктура продолжает изменяться при последующем хранении и на ранних стадиях эксплуатации, что приводит к нежелательным эффектам коробления и расклевывания изделий.

### Литература

- Машеков, С. А.; Нуртазаев, А. Е.; Удербаетаева, А. Е. 2009. Численное моделирование методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния при ковке по существующей технологии алюминиевых сплавов, в кн.: *Проблемы инновационного развития нефтегазовой индустрии*. Вторая международная научно-практическая конференция. Алматы: КБТУ, 135–139.
- Жансеркеева, З. А.; Сыздыкова, Б. О.; Чумаков, Е. В. 2010. Комплексные исследования стали 09Г2С. Влияние деформационного упрочнения на механические свойства, в кн.: *Труды Первой международной конференции «Новое в станкостроении, материаловедении и автоматизированном проектировании машиностроительного производства»*. Т. I, 275–278. Алматы.
- Чумаков, Е. В.; Машеков, С. А.; Удербаетаева, А. Е. 2009. Проблемы изготовления сложных профилей из алюминиевого сплава АД31, *Новости науки Казахстана* 4: 44–51.
- Чумаков, Е. В.; Жансеркеева, З. А. 2007. Исследование деформационного упрочнения металлов и сплавов на неустановившейся стадии ползучести, *Вестник КазНТУ им. К. Сатпаева* 2(59): 82. Алматы.

Чумаков, Е. В.: Жансеркеева, З. А. 2008. Деформационное упрочнение алюминия и титана, *Вестник КазАТК* 3: 97. Алматы.

Чумаков, Е. В.: Аблакатов, И. 2012. Деформационное упрочнение алюминиевого сплава АД31, в кн.: *XIV Международная научно-техническая конференция «Безопасность техно-сферы»*. Т. 3: 59–61. Москва: НИТУ МИСиС.

## **IŠANKSTINĖS PLASTINĖS DEFORMACIJOS DYDŽIO ĮTAKOS DIRBTINIO SENDINIMO DINAMIKA I TYRIMAS**

**E. Chumakov, S. Shukbarova, I. Gedzevičius, J. Gargasas**

Santrauka

Produkcijos kokybės gerinimas mašinų gamybos pramonėje glaudžiai susijęs su naujų medžiagų ir technologijų diegimu. Aliuminio lydiniai plačiai naudojami mašinų gamybai. Straipsnyje pateikiami aliuminio lydinio AD31 (AW 6060) tyrimų rezultatai. Aliuminio lydinys priklauso deformuojamųjų ir sendinamųjų lydinų grupei. Po kristalizacijos vykstančių sendinimo procesų intensyvumas priklauso nuo daugybės sąlygų: tūrinio temperatūros gradiento kristalizacijos metu, lydinio perkaitimo temperatūros, išlaikymo, išpilstymo ir kristalizacijos greičio.

**Reikšminiai žodžiai:** plastinė deformacija, terminis apdorojimas, dirbtinis sendinimas.

## **RESEARCH OF PRELIMINARY PLASTIC DEFORMATION VALUE INFLUENCE ON ARTIFICIAL AGEING DYNAMICS**

**E. Chumakov, S. Shukbarova, I. Gedzevicius, J. Gargasas**

Abstract

Product quality improvement in the machine manufacturing industry is tightly associated with the introduction of new materials and technologies. Aluminium alloys are widely used in different machine production industries. This paper presents the research results of aluminium alloy AD31 (AW 6060). Aluminium alloy is a part of the group subject to deformation and artificial ageing. The intensity of the ageing process occurring after the crystallization depends on various conditions such as volumetric temperature gradient during crystallization, alloy overheat temperature, its duration of exposure, dispensing, and crystallization.

**Keywords:** plastic deformation, heat treatment, artificial ageing.