

## ИЗУЧЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1561 В ЛИТОМ СОСТОЯНИИ

*Ш.Т. Пазылов, Н.А. Оморов, Я.И. Рудаев*

Изучено деформационное поведение литого алюминиевого сплава 1561 при растяжении. Установлено, что неоднородности деформационных свойств по объему металла, полученные в нормальных условиях, выравниваются при высоких гомологических температурах.

*Ключевые слова:* структурное состояние; деформационные свойства; условия деформирования; дисперсионный анализ.

Одним из традиционных способов оценки технологичности металлических материалов при обработке давлением является изучение закономерностей высокотемпературного деформирования в широком интервале скоростей деформаций. Для этого исследуется зависимость сопротивления и показателя пластической деформации от температуры, скорости и степени деформаций, а также в некоторых случаях от текущего структурного состояния материала. При этом возникает необходимость оценки каждого из перечисленных факторов, учитывающих исходные условия нагружения, а также особенности влияния структурного состояния материала на показатели деформационных свойств. Задачи такого типа можно решать с использованием методов однофакторного или многофакторного дисперсионного анализа, которые позволяют дать количественную оценку вклада того или иного внешнего фактора (условия деформирования) на изучаемые показатели пластичности (деформационные свойства), либо обосновано отвергнуть влияние этих факторов [1].

Исследуемым материалом является алюминиевый сплав 1561 в литом состоянии со следующим химическим составом: 5,75 – 0,02 % *Mg*; 1,03 % *Mn*; 0,16 % *Zr*; 0,12 % *Si*; 0,08 % *Fe*;

остальное – *Al*. Для изучения закономерностей деформации использована исходная заготовка из указанного сплава в форме пластины размером 0,9×0,24×0,06 м, прошедшая после литья гомогенизационный отжиг при температуре 733±5 К в течение 24 часов с последующим охлаждением на воздухе. Обычно гомогенизационный отжиг производится с целью уменьшения дендритной ликвации, снятия остаточных напряжений в структуре металла, возникших вследствие неравновесных условий кристаллизации, а также повышения технологической пластичности материала [2, 3]. Как известно [4], исходный слиток после затвердевания состоит из трёх зон: узкой мелкозернистой корковой зоны, зоны удлинённых дендритных кристаллов и внутренней зоны крупных равноосных кристаллов. Очевидно, что проведенный гомогенизационный отжиг полностью не устраняет структурные неоднородности во всем объеме исходной заготовки. Он также не может гарантировать однородности механических и деформационных свойств образцов, изготовленных из отдельных зон объема литого материала. В связи с этим очень важно убедиться в том, что некоторые остаточные после гомогенизационного отжига структурные особенности упомянутых зон не повлияют на закономерности

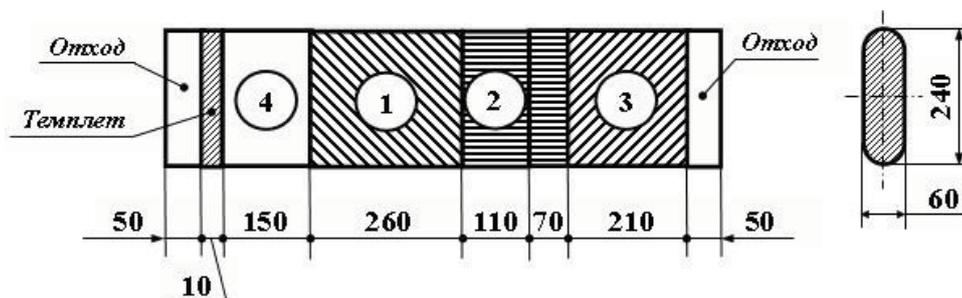


Рис. 1. Схема слитка сплава 1561 (АМг61) и его разрезки на участки.

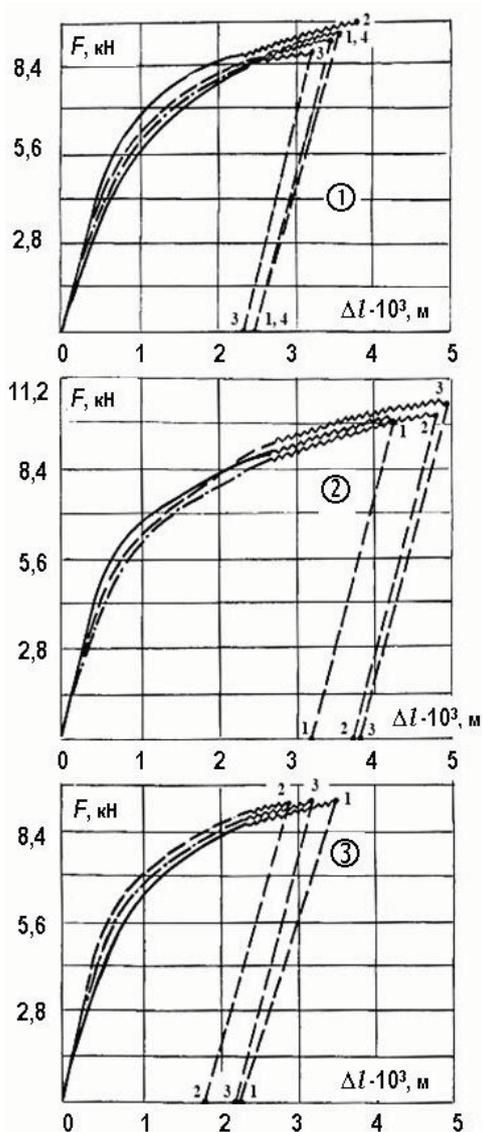


Рис. 2. Исходные диаграммы “нагрузка – абсолютное удлинение” сплава 1561 (АМг61) в литом состоянии (1...4 – номера образцов).

деформационного поведения сплава при испытаниях в широких температурно-скоростных диапазонах. Поэтому, прежде чем приступить к получению закономерностей температурно-скоростного деформирования исследуемого материала, возникает необходимость экспериментальной изучения влияния неоднородности литой структуры в объеме исходной заготовки на его деформационное поведение. При этом требуется установить, как отразятся указанные неоднородности на изменения температурных и скоростных условий деформирования материала.

В настоящей работе на примере алюминиевого сплава 1561 оценивается влияние на усилие деформирования, показатели прочности и пластичности исходной неоднородности структуры материала при фиксированных значениях скорости деформирования, температуры и степени деформации. При таком подходе многофакторный дисперсионный анализ сводится к однофакторному. Рассматриваемая задача реализуется путём сопоставления механических и деформационных характеристик при растяжении образцов, изготовленных из различных участков по длине заготовки, которые позволили получить образцы предположительно с различной структурой. При вырезке образцов исходная пластина была разделена на близкие по длине три участка 1, 2, 3 (рис. 1), из которых в направлении продольной оси отливки изготавливались образцы для испытания на растяжение (ГОСТ 1197–84). Образцы длиной рабочей части  $l = 30 \text{ мм}$  и диаметром круглого поперечного сечения  $d = 6 \text{ мм}$  имели резьбовые головки для закрепления их к захватам испытательной машины.

Для испытания образцов на растяжение при нормальной и повышенной температурах была использована установка ЦСТ 2/3, оснащенная коробкой скоростей и электродвигателем. Измерения температуры образца при испытаниях проводилась хромель-алюмелевыми термопа-

рами и её регистрация осуществлялась на потенциометре КСП-4. Суммарные погрешности измерения и регистрации температуры не превышали  $\pm 3$  К. Запись диаграммы “нагрузка – удлинение” (“ $F-\Delta l$ ”) реализовалась на графопостроителе Н-307. Подробное описание техники и методики проведения эксперимента приведены в [5].

С целью статистической обработки результатов опыты на растяжение при нормальной (комнатной) и повышенных температурах, а также различных скоростях деформирования, проводились не менее чем на трех образцах по каждой программе испытания. Для обеспечения однородности результатов наблюдений осуществлялась обязательная проверка их по критерию Н.В. Смирнова [6].

Испытание образцов в условиях нормальной температуры проводились при скоростях деформирования  $2,3 \cdot 10^{-5}$  м·с<sup>-1</sup>, соответствующей статическому характеру нагружения. Полученные опытные диаграммы “ $F-\Delta l$ ” позволили исследовать влияние положения образцов (точнее их структуры) по длине слитка на условный предел текучести, временное сопротивление и относительное остаточное удлинение.

На рис. 2 приведены исходные диаграммы “ $F-\Delta l$ ” для всех испытанных (при нормальных температурах) образцов из 1...3 участков слитка. Для участков 2 и 3 оказалось достаточным испытать по три образца. В процессе статистической обработки результаты испытания образца 2 из 1

участка слитка были признаны аномальными и исключены из рассмотрения.

В табл. 1 приведены механические свойства сплава 1561 для каждого испытанного образца и усредненные показатели их с доверительными интервалами (при уровне доверительной вероятности 0,95). На основании полученных результатов можно обнаружить, что по длине слитка механические свойства изменяются существенно: наибольшими прочностью и пластичностью обладает материал, находящийся в 2 участке слитка.

Для обоснованности выводов о существенном различии механических свойств сплава по длине слитка проводилась статистическая обработка полученных для каждой партии (участков слитка) диаграмм “ $F-\Delta l$ ”. Значение статистической характеристики по проверке гипотезы об однородности дисперсии относительных удлинений ( $G_{\max}$ ) получено равным

$$G_{\max} = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^m S_i^2} = \frac{0,8738}{1,501} = 0,582,$$

где  $S_i^2$  – дисперсия относительных удлинений отдельных партий;  $S_{\max}^2$  – максимальное значение из трёх дисперсий, подсчитанных для каждой партии.

Согласно критерию Кохрена, дисперсии однородны, если для рассматриваемого ряда величина  $G_{\max}$  меньше критического значения  $G_{\alpha}$  [1], поскольку в условиях осуществляемых опытов

Таблица 1

Показатели механических свойств сплава при растяжении

Участок слитка	Номер образца	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\delta$ , %
1	1	168,4	331,8	8,33
	2	177,3	312,0	7,88
	3	183,2	326,8	8,33
	Среднее	175,0 $\pm 18,7$	323,5 $\pm 25,6$	8,18 $\pm 0,65$
2	1	188,2	346,8	10,50
	2	173,3	366,6	12,32
	3	183,2	356,7	11,78
	Среднее	181,6 $\pm 18,8$	356,7 $\pm 24,6$	11,53 $\pm 2,32$
3	1	203,0	331,9	7,52
	2	208,0	327,0	6,11
	3	203,0	336,9	7,25
	Среднее	204,7 $\pm 7,2$	331,9 $\pm 12,3$	6,96 $\pm 1,86$

Таблица 2

Компоненты дисперсии	Число степеней свободы	Дисперсия
Между партиями	$k_1 = 2$	$S_1^2 = 16,7979$
Внутри партий	$k_2 = 6$	$S_1^2 = 0,5004$

Таблица 3

Анализ влияния положения образцов по длине слитка на средние значения деформирующего усилия при фиксированных значениях удлинения

$\Delta l$ , мм	Компоненты дисперсии	Число степеней свободы	Дисперсия	$\bar{F} = S_1^2 / S_2^2$
1	Между партиями Внутри партий	$k_1 = 2$ $k_2 = 6$	$S_1^2 = 1911$ $S_1^2 = 343$	5,72
2	Между партиями Внутри партий	$k_1 = 2$ $k_2 = 6$	$S_1^2 = 1410$ $S_1^2 = 103$	13,69
3	Между партиями Внутри партий	$k_1 = 2$ $k_2 = 6$	$S_1^2 = 5167$ $S_1^2 = 267$	19,35

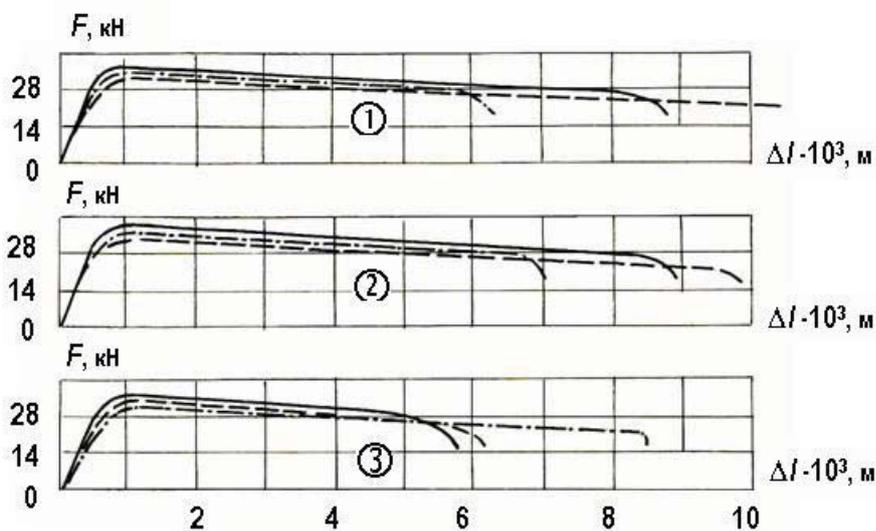


Рис. 3. Диаграмма растяжения для трех участков слитка сплава 1561 (АМг61) при 573 К;  $2,3 \cdot 10^{-4} \text{ мс}^{-1}$ .

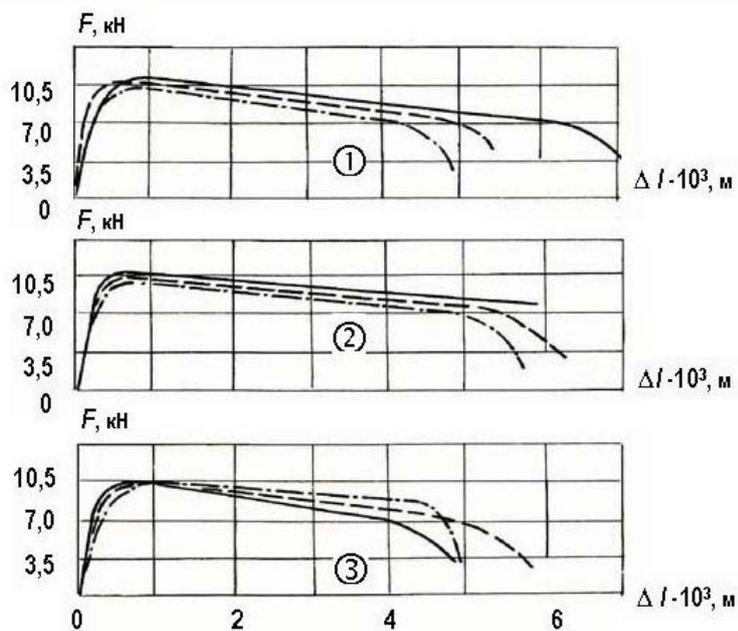


Рис. 4. Диаграмма растяжения для трех участков слитка сплава 1561 (AMg61) при 693 К;  $2,3 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ .

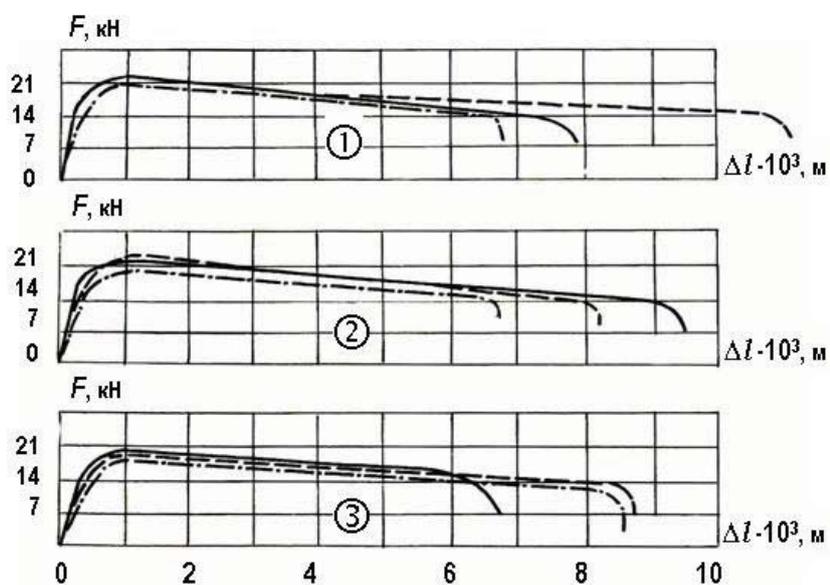


Рис. 5. Диаграммы растяжения для трех участков слитка сплава 1561 (AMg61) при 693 К;  $2,3 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ .

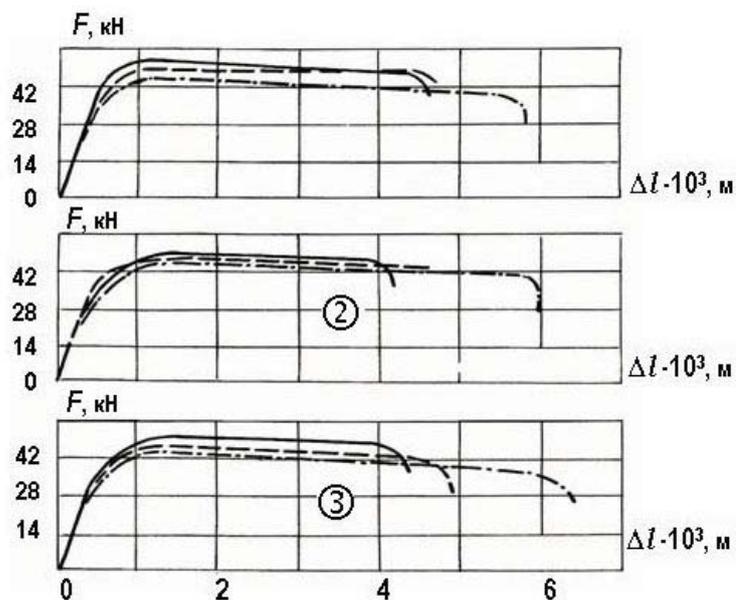


Рис. 6. Диаграмма растяжения для трех участков слитка сплава 1561 (AMg61) при 573 К;  $2,3 \cdot 10^{-5} \text{ мс}^{-1}$ .

Таблица 4

Анализ влияния положения образцов по длине слитка на средние значения растягивающего усилия при деформации в режиме  $\theta = 573 \text{ К}$ ,  $\nu_3 = 3,6 \cdot 10^{-4} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$

$\Delta l$ , мм	Компоненты дисперсии	Число степеней свободы	Дисперсия	$\bar{F} = S_1^2 / S_2^2$
2	Между партиями Внутри партий	$k_1 = 2$ $k_2 = 6$	$S_1^2 = 17,89$ $S_2^2 = 17,01$	1,05
3	Между партиями Внутри партий	$k_1 = 2$ $k_2 = 6$	$S_1^2 = 4,831$ $S_2^2 = 28,248$	0,171
4	Между партиями Внутри партий	$k_1 = 2$ $k_2 = 6$	$S_1^2 = 4,107$ $S_2^2 = 51,722$	0,079

(уровне значимости  $\alpha = 0,05$ , объеме партий  $m = 3$ , количестве измерений  $n = 3$  и степени свободы  $k = n - 1 = 2$ )  $G_\alpha = 0,8709$ , т.е.  $G_{\max} \leq G_\alpha$ . Этим подтверждается гипотеза об однородности дисперсии, т.е. гипотеза о нормальном законе распределения измеряемой величины. Результаты дисперсионного анализа равенства средних величин относительного остаточного удлинения в зависимости от местоположения рассматриваемых партий образцов в слитке, приведены в табл. 2.

Из данных табл. 2 видно, что оценка равенства средних значений удлинения по дисперсионным отношениям будет равна  $\bar{F} = (S_1^2 / S_2^2) = 33,56$ ,

которая намного больше (при принятом уровне значимости) критического значения  $F_{0,95} = 5,14$ . Поэтому гипотеза о равенстве средних значений удлинений образцов из отдельных участков слитка отвергается. Иными словами, положение участков, из которых нарезались образцы для испытания, существенно влияет на величину относительного удлинения.

Оценка равенства средних значений прочностных показателей осуществлялась также путём дисперсионного анализа данных измерения величин деформирующих усилий, возникающих в процессе нагружения.

С этой целью были выбраны три уровня деформации (удлинение образцов  $\Delta l_1 = 1, 2$  и  $3$  мм) и установлены соответствующие этим удлинениям величины нагрузки  $F_i$  для каждого образца. Далее определяли среднее значение этих усилий ( $F_i$ ), дисперсии ( $S_i^2$ ) для каждой группы (соответствующие отдельным участкам слитка) образцов и значения  $G_{\max}$  при всех трёх уровнях деформации. После чего по критерию Кохрена проверяли гипотезу однородности полученного ряда дисперсии. При этом величины  $G_{\max} = 0,6190; 0,6471; 0,7672$ , соответствующие удлинениям  $\Delta l_1 = 1, 2$  и  $3$  мм оказались намного меньше критического значения  $G_\alpha = 0,8738$  для данных конкретных условий опытов, что не позволило поставить под сомнение однородность дисперсий.

После этого для каждого из трёх уровней деформации был проведен однофакторный дисперсионный анализ с целью установления равенства средних значений усилий деформирования ( $F_i$ ) для всех участков слитка. В этом случае принято считать незначимыми влияние возможных неоднородностей химического состава и скорости охлаждения отдельных участков заготовки (слитка) на прочностные и деформационные свойства (диаграмма “ $F-\Delta l$ ”) образцов вырезанных из этих зон слитка. Дальнейший расчет проводился по общепринятой схеме [6]. Гипотеза о равенстве средних проверялась по критерию Фишера с учетом принятого уровня значимости ( $\alpha = 0,05$ ). Результаты дисперсионного анализа представлены в табл. 3.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что для каждого уровня  $\Delta l_i$  дисперсионное отношение  $\bar{F} > \bar{F}_{\text{ооаае}} = 5,14$  и с увеличением степени деформации этот показатель растет. Следовательно, место вырезки образцов из отдельных участков заготовки (слитка) оказывает значительное влияние на показатели прочности сплава при испытании их в нормальных (комнатных) температурных условиях.

Для выяснения вопроса о степени влияния температурных и скоростных условий нагружения на полученные выше структурные неоднородности в объеме слитка, следствием которых являются неоднородности деформационных свойств в его отдельных участках, были испытаны образцы из этих зон заготовки при двух уровнях температуры ( $573$  и  $693$  К) и двух скоростях деформирования ( $2,3 \cdot 10^{-5}$  и  $3,6 \cdot 10^{-3}$  м·с<sup>-1</sup>).

Диаграммы испытания этих образцов при указанных режимах показаны на рис. 3...6.

Каждая партия диаграмм, полученных в результате температурно-скоростных испытаний, подвергалась совместной статистической обработке. При этом минимальное количество уровней деформации ( $\Delta l_i = 1, 2, 3 \dots$  мм) подлежащих статистической обработке составили от 4 до 6 мм ( $\Delta l = 1 \dots 4$  или  $\Delta l = 1 \dots 6$  мм) в зависимости от температурных и скоростных режимов деформирования, т.е. в пределах отдельных рассматриваемых серий опытов. Результаты, например, дисперсионного (статистического) анализа данных опытов при температуре  $573$  К и скорости деформирования  $3,6 \cdot 10^{-4}$  м·с<sup>-1</sup> для трёх уровней деформации приведены в табл. 4.

Предварительной статистической обработкой было установлено, что в пределах каждой партии при всех рассмотренных степенях деформации дисперсии  $S_i^2$ , характеризующее рассеяние случайной величины около среднего значения (математического ожидания) ( $F_i$ ) каждой выборки, однородны.

Последующий дисперсионный анализ температурно-скоростных диаграмм “ $F-\Delta l$ ”, приведенный по величине соответствующих значений  $F_i$  при различных уровнях деформации (удлинений  $\Delta l_i$ ) показал, что в пределах каждой группы сопоставляемых между собой диаграмм имеет место равенство (однородность) средних значений ( $F_i$ ) деформирующих усилий (т.к.  $\bar{F} = S_1^2 / S_2^2 < \bar{F}_1 = 5,14$ ). Последнее свидетельствует о наличии для каждой рассматриваемой группы при каждом уровне деформации выборочного общего среднего значения  $F$  и выборочной общей дисперсии  $S^2$ .

Таким образом, методами дисперсионного анализа осуществлена количественная оценка влияния неоднородности литого структурного состояния в объеме заготовки (слитка) на деформационные показатели образцов, вырезанных из различных его участков.

#### Выводы

1. При одноосном растяжении одинаковых партий образцов из литого сплава 1561 при нормальной температуре и статическом характере приложения нагрузки механические свойства отличаются по длине заготовки. Установлено, что изменения механических свойств не являются случайными и обусловлены начальной неоднородностью литой структуры в объеме исходной заготовки материала.

2. Деформирование при повышенных температурах приводит к устранению неоднородности исходного материала и способ-

ствуется выравниванию свойств по длине слитка. Такое предположение справедливо и для более высоких, чем статические, скоростей деформирования.

На основе сформулированных выводов можно утверждать, что при установлении закономерностей температурно-скоростного деформирования (температурах выше 573 К) сплава 1561 в литом состоянии нет необходимости принимать во внимание факт участка слитка, из которого вырезаны испытываемые образцы.

### *Литература*

1. *Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В.* Курс теории вероятности и математической статистики для технических приложений. – М.: Наука, 1965.
2. *Золоторевский В.С.* Структура и прочность литых алюминиевых сплавов. – М.: Metallurgy, 1981.
3. *Колачев Б.А., Габидулин Р.М., Пигузов Ю.В.* Технология термической обработки цветных металлов и сплавов. – М.: Metallurgy, 1980. – 280 с.
4. *Лахтин Ю.М., Леонтьева В.М.* Материаловедение. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1980. – 493 с.
5. Особенности деформации алюминиевых сплавов в состоянии рекристаллизационной сверхпластичности / Ш.Т. Пазылов, В.А. Паняев // Прочность материалов и конструкций энергетического оборудования. – Фрунзе: ФПИ, 1987. – С. 86–97.
6. *Степанов М.Н.* Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. – М.: Машиностроение, 1986.