

УДК 539.376:621

*Е.В. Чумаков*

## **АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ НА НЕУСТАНОВИВШЕЙСЯ СТАДИИ ПОЛЗУЧЕСТИ**

*E.V. Chumakov*

### **ANALYZING THE PROCESS OF STRAIN HARDENING AT THE TRANSIENT CREEP STAGE**

Работа посвящена исследованию эффекта деформационного упрочнения при кратковременных и длительных испытаниях, выявлению их общих закономерностей и отличительных особенностей. Получены математические выражения для расчета мгновенных скоростей ползучести на неустановившейся стадии. Выполнены систематические экспериментальные исследования закономерностей деформационного упрочнения и его влияния на скорость ползучести на неустановившейся стадии. Показано, что деформационное упрочнение на неустановившейся стадии проявляется в увеличении предела текучести. Установлено, что неустановившаяся стадия ползучести имеет две области: быстрого и медленного упрочнения.

ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ; НАПРЯЖЕНИЕ; ПОЛЗУЧЕСТЬ; СКОРОСТЬ ПОЛЗУЧЕСТИ; ДЕФОРМАЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ.

The work is devoted to the research of strain hardening effect at short- and long-term tests, their regularities and distinctive features. The author has fulfilled systematic pilot studies of regularities of strain hardening and its influence on the creep speed at the transient stage. The studies have resulted into mathematical expressions to calculate instant creep speeds at transient stage. It has been established that strain hardening at the transient stage is reflected by the increase in the limit of fluidity, which is described by the sedate equation.

FLUIDITY LIMIT; PRESSURE; CREEP; SPEED OF CREEP; STRAIN HARDENING.

Набор конструкционных материалов, используемых в промышленном производстве и обладающих разными свойствами, велик. Но для всех них одно требование является общим — это способность как можно большее время сохранять заданные размеры и форму, что зависит от их длительных и кратковременных механических свойств. К первым относятся ползучесть, длительная прочность, запас длительной пластичности, а ко вторым — предел текучести, временное сопротивление, модуль упругости, микротвердость и др. Перечисленные свойства определяют деформационное поведение металлов и сплавов при различных условиях их эксплуатации [1, 2], что является причиной и обоснованием актуальности их интенсивного изучения. Практическая значимость результатов определяется возможностью их использования в инженерной практике, в расчетах при про-

ектировании машин и механизмов для более точной и обоснованной оценки их работоспособности.

Все еще остается множество нерешенных задач, препятствующих созданию единой теории пластического течения кристаллического твердого тела. Ползучесть относится к числу основных процессов, приводящих к формоизменению деталей машин и механизмов, работающих под нагрузкой. При ползучести пластичных материалов выделяют три стадии. Из них наименее изученной является неустановившаяся стадия, на которой скорость ползучести затухает до момента наступления установившейся стадии. Несомненный научный интерес представляет исследование процессов, приводящих к затуханию скорости ползучести. В учебной и научной литературе указанное явление объясняется деформационным упрочнением, которое приводит

к росту прочностных характеристик (предел текучести и временное сопротивление) и снижению запаса пластичности.

С учетом сказанного была сформулирована цель работы: провести систематические экспериментальные исследования закономерностей деформационного упрочнения и его влияния на скорость ползучести на неустановившейся стадии.

### Материал и методика исследования

Объектом исследования был выбран сплав алюминия с 0,2 % кремния и 0,15 % железа. Исследования проводились на стандартных цилиндрических образцах диаметром 5 мм и длиной рабочей части 30 мм (рис. 1).

**Методика исследований.** Испытания проводились в условиях одноосного растяжения. По результатам кратковременных испытаний строились диаграммы растяжения для определения величин предела текучести  $\sigma_{02}$ . При длительных испытаниях получали первичную кривую ползучести.

После закрепления образца в захватах и его нагрева (если испытания проводились при повышенных температурах) его нагружали до того момента, когда растягивающая сила достигала значений соответствующих требуемому напряжению в рабочей части исследуемого образца. После этого — увеличение нагрузки, и образец длительное время деформировался под воздействием созданных нагрузкой напряжений. Обработка первичной кривой ползучести ввиду непостоянства скорости представляла опреде-

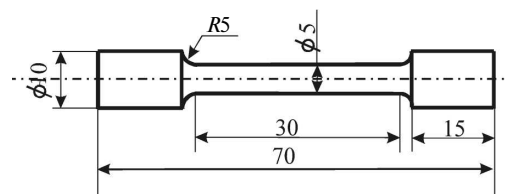


Рис. 1. Цилиндрический образец для механических испытаний

ленные трудности. В нашей работе был осуществлен следующий подход.

В общем случае скорость ползучести определяется первой производной накопленной деформации по времени, то есть

$$\dot{\epsilon} = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta t}, \quad (1)$$

где  $\dot{\epsilon}$  — скорость ползучести;  $\Delta \epsilon$  — накопленная пластическая деформация;  $\Delta t$  — время, за которое она накоплена. В предельном случае

$$\dot{\epsilon} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \epsilon}{\Delta t} = \frac{d\epsilon}{dt}. \quad (2)$$

Уравнение (2) представляет собой выражение для расчета мгновенной скорости в любой точке кривой ползучести. В качестве примера на рис. 2 показаны точки с координатами  $(\epsilon_1, t_1)$  для точки 1,  $(\epsilon_2, t_2)$  для точки 2,  $(\epsilon_3, t_3)$  для точки 3 и  $(\epsilon_i, t_i)$  для  $i$ -й точки. Выбрав временные интервалы  $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3 = \Delta t_i$ , определяем для них величины накопленной пластической деформации  $\Delta \epsilon_1, \Delta \epsilon_2, \Delta \epsilon_3, \dots, \Delta \epsilon_i$  и скорости ползучести.

Для каждого испытываемого на ползучесть образца кроме скорости ползучести определялась величина предела текучести  $\sigma_{02}$ . Это позволяли сделать конструкция экспериментальной

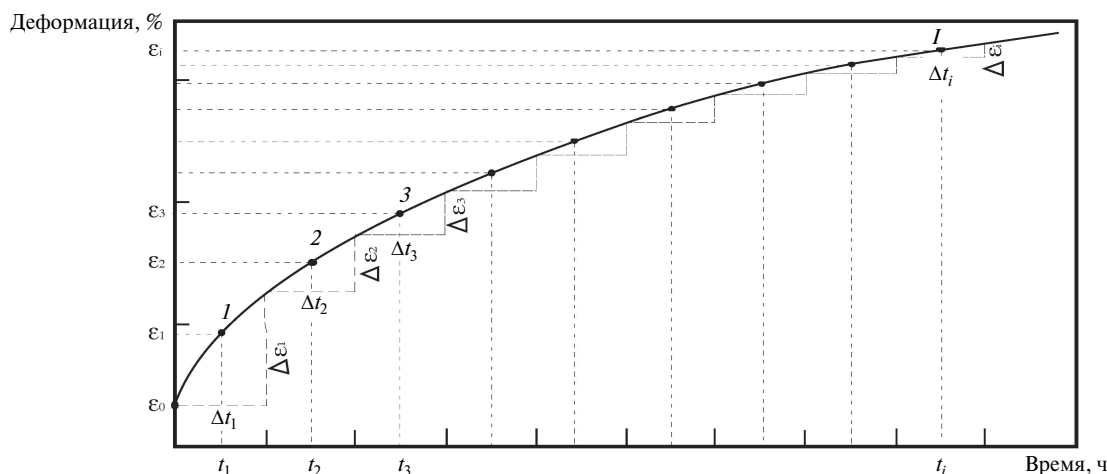


Рис. 2. Схема обработки кривых ползучести на неустановившейся стадии

машины и разработанная методика эксперимента [3, 4]. Подробно результаты исследований деформационного упрочнения при кратковременных механических испытаниях опубликованы в работах [5, 6].

### Результаты исследований

Как было отмечено, с деформационным упрочнением связывают постепенное уменьшение скорости ползучести на неустановившейся стадии. Иллюстрацией сказанному служит рис. 3.

Эксперименты были проведены на алюминиевых образцах с 0,2 % кремния и 0,15 % железа в условиях одноосного растяжения при постоянном уровне напряжений. Напряжения выбирались таким образом, чтобы скорости ползучести к моменту выхода на установившуюся

стадию находились в интервале  $10^{-7}$ – $10^{-9}$  с<sup>-1</sup>. Указанные значения скоростей ползучести либо соответствуют, либо близки к таковым в рабочих деталях машин и механизмов. Ниже приведены кривые ползучести, полученные в результате испытаний при разных напряжениях.

В процессе испытания накопленная пластическая деформация за одинаковые временные интервалы уменьшается, достигая некоторого постоянного значения. Этот факт свидетельствует о выходе ползучести на установившуюся стадию. После этого образец разгружался, и снималась диаграмма растяжения для определения предела текучести после окончания неустановившейся стадии. Поскольку считается, что на установившейся стадии ползучести структура образца не меняется, а следовательно, не меняется

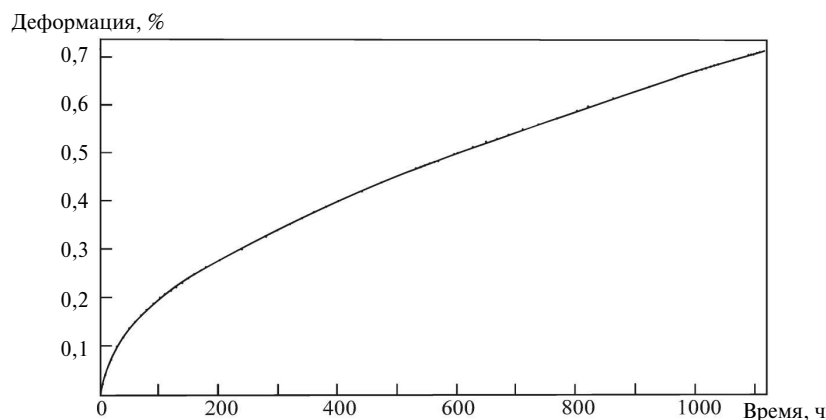


Рис. 3. Кривая ползучести образца Al + 0,2Si + 0,15 Fe при напряжении 38 МПа. Температура испытания 295 К

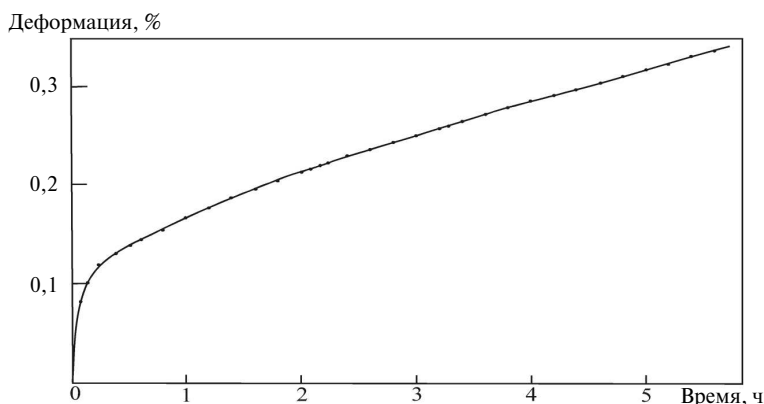


Рис. 4. Кривая ползучести образца Al + 0,2Si + 0,15 Fe при напряжении 57 МПа. Температура испытания 295 К. Мгновенная деформация  $\epsilon_0 = 8,7$  %

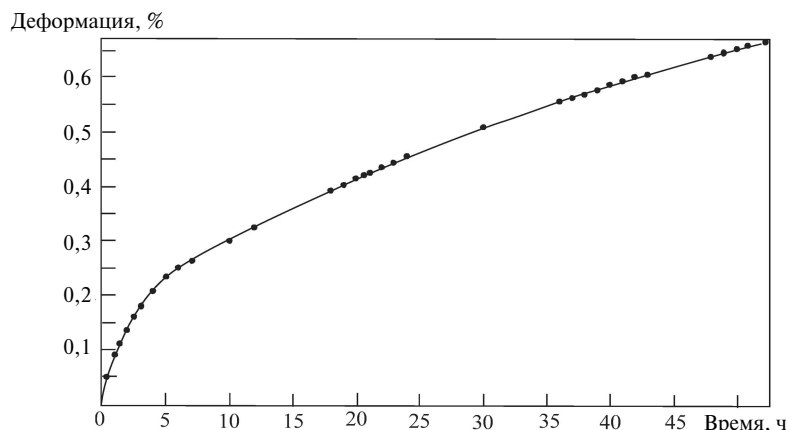


Рис. 5. Кривая ползучести образца Al + 0,2Si + 0,15 Fe при напряжении 53 МПа.

Температура испытания 295 К. Мгновенная деформация  $\varepsilon_0 = 6,5 \%$

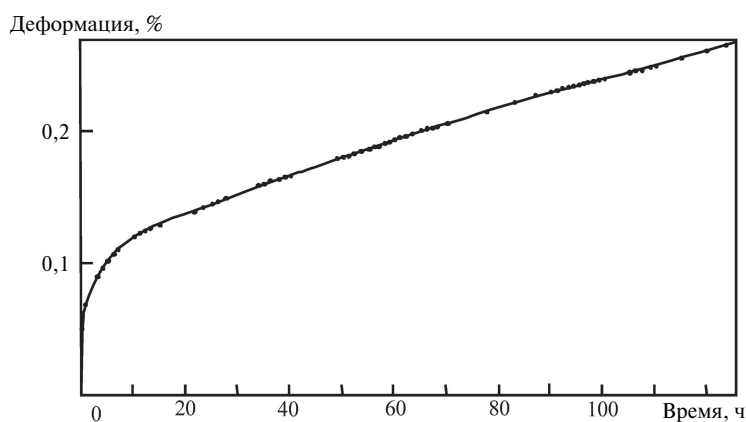


Рис. 6. Кривая ползучести образца Al + 0,2Si + 0,15 Fe при напряжении 45 МПа.

Температура испытания 295 К. Мгновенная деформация  $\varepsilon_0 = 3,3 \%$

величина предела текучести, то точного определения времени перехода от неустановившейся стадии к установившейся не требуется. А малые величины накопленной пластической деформации уже на установившейся стадии не дают заметных погрешностей при построении графиков зависимостей предела текучести от накопленной деформации в процессе ползучести на неустановившейся стадии.

На рис. 7 показаны частичные диаграммы растяжения образца, который испытывался на ползучесть при напряжении 38 МПа. Видим, что при первом нагружении предел текучести был равен 28 МПа, а после испытания на ползучесть он стал равен 33,9 МПа, что на 21 % выше на-

чального. Это означает, что при длительных испытаниях на ползучесть также наблюдается деформационное упрочнение. Для сравнения деформационного упрочнения при кратковременных и длительных испытаниях на рис. 8 показана пара графиков.

Следует отметить, что в данном случае учитывалась общая накопленная деформация, т. е. мгновенная деформация и накопленная в процессе ползучести:

$$\varepsilon_{\Sigma} = \varepsilon_0 + \varepsilon, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_{\Sigma}$  — суммарная деформация;  $\varepsilon_0$  — мгновенная деформация;  $\varepsilon$  — деформация на неустановившейся стадии.

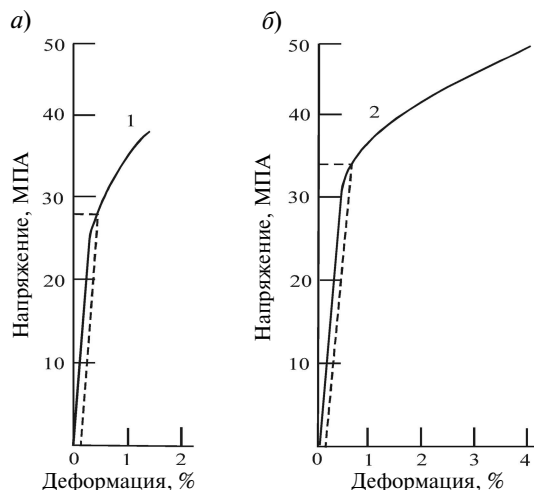


Рис. 7. Диаграммы растяжения, снятые до (а) и после (б) испытания на ползучесть образца Al + 0,2Si + 0,15 Fe при напряжении 38 МПа

Качественно одинаковый вид зависимостей  $\sigma_{02} = \varphi(\varepsilon)$  говорит о возможности использования для ее описания уравнения

$$\sigma_{02j} = \varphi_j \varepsilon^{v(j)}, \quad (4)$$

где  $j$  — это «к» при испытаниях кратковременных и «п» — при ползучести. В этом уравнении функционально связаны две величины, участвующие в рассмотрении вопроса о деформационном упрочнении на неустановившейся стадии ползучести. Выражение (4), полученное на основе

анализа экспериментальных данных, представляет собой единое уравнение, применимое к описанию деформационного упрочнения при кратковременных и длительных испытаниях. Но следует отметить, что коэффициенты, в него входящие, имеют разные численные значения для двух видов испытаний.

Для более детального анализа изменения скорости ползучести на неустановившейся стадии с течением времени были построены и проанализированы графики ее зависимости от времени испытания. При этом вся накопленная на неустановившейся стадии пластическая деформация делилась на равные интервалы. В качестве примера на рис. 9 такой интервал был принят равным 0,1 %. Затем для каждого интервала определялся временной промежуток, за который эта деформация накапливалась.

На рис. 9 видно, что временной промежуток в процессе испытания постоянно увеличивается. К примеру, в начале эксперимента деформация, равная 0,1 %, накапливается за примерно 18 часов, а в конце на накопление такой же пластической деформации требуется около 30 часов. Со снижением напряжения это различие становится более значительным. При испытании с напряжением 38 МПа (рис. 10) такие же уровни пластической деформации в начале и конце эксперимента достигаются соответственно за 31 час и 354 часа.

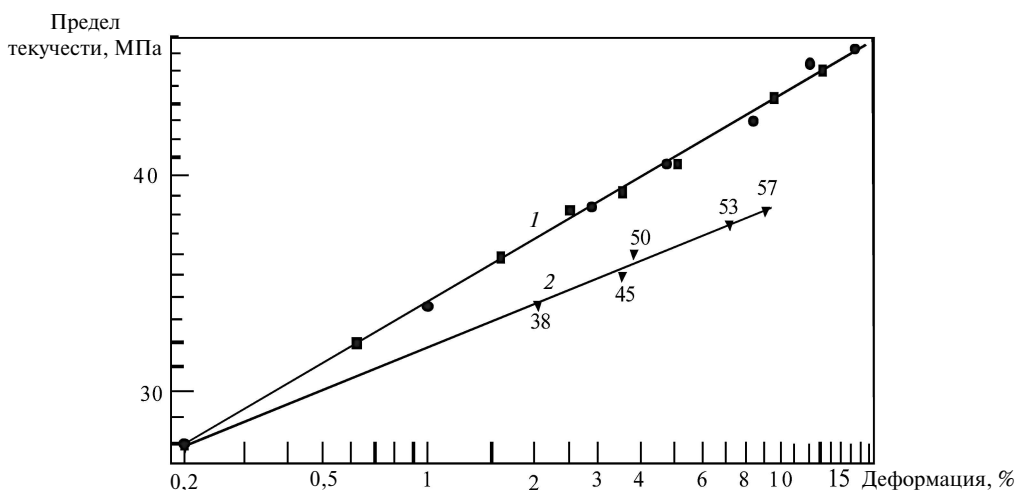


Рис. 8. Зависимость предела текучести от накопленной пластической деформации при кратковременных испытаниях (1) и испытаниях на ползучесть на неустановившейся стадии (2) образцов сплава Al + 0,2Si + 0,15 Fe.

Температура испытания 295 К. Цифры у точек — напряжения, при которых проводились испытания

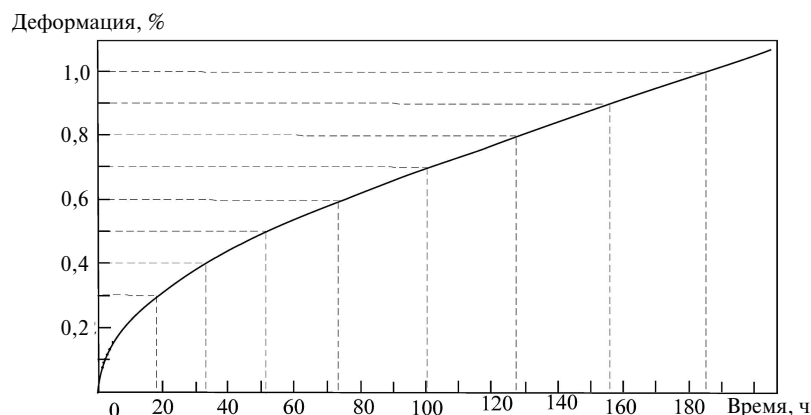


Рис. 9. Кривая ползучести образца Al + 0,2Si + 0,15 Fe при напряжении 50 МПа.

Температура испытания 295 К. Мгновенная деформация  $\epsilon_0 = 3,73 \%$

Поиск возможностей описания деформационного поведения на неуставившейся стадии привел к построению зависимостей скорости ползучести от величины накопленной пластической деформации.

При детальном рассмотрении графиков, приведенных на рис. 10, обнаруживается одна особенность. Прямые линии, отражающие зависимость  $\dot{\epsilon} = f(\epsilon)$ , имеют перегибы, приходящиеся на величину накопленной пластической деформации, равную 0,1 %. А это означает, что существуют две области, которые требуют дополнительных исследований — области быстрого изменения скорости ползучести и медленного. Обозначим их условно: область I и область II. Независимо от напряжения, при котором проводились испытания, перегиб графиков приходится на одну и ту же деформацию, равную 0,1 %. На рис. 10 пунктиром показаны усредненные линии. Там же для наглядности на графике 2, штрих-пунктирной линией показана экстраполяция из области II в область I. Совершенно очевидно, что штрих-пунктирная и сплошная линия представляют собой два расходящихся луча. Ситуация аналогична для всех графиков, показанных на рис. 10.

Графики в двойных логарифмических координатах для пяти испытанных на ползучесть образцов имеют вид прямых линий. Из этого следует, что зависимость скорости ползучести на неуставившейся стадии от накопленной деформации — степенная, подчиняется уравнению

$$\dot{\epsilon} = q\epsilon^{-\mu}, \quad (2)$$

$q$  и  $\mu$  — коэффициент и показатель степени, физический смысл которых пока неясен.

Итак, основные выводы следующие:

Деформационное упрочнение на неуставившейся стадии проявляется в увеличении предела текучести.

Зависимость предела текучести от накопленной на неуставившейся стадии ползучести

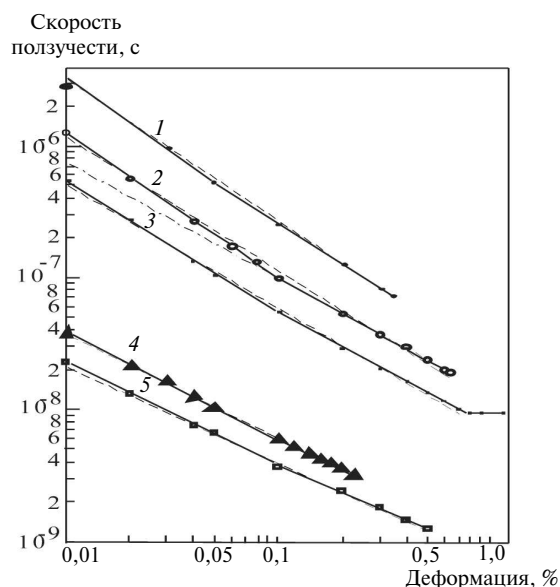


Рис. 10. Зависимость скорости ползучести на неуставившейся стадии образцов Al + 0,2Si + 0,15 Fe от накопленной пластической деформации при напряжениях 57 (1), 53 (2), 50 (3), 45 (4) и 38 (5) МПа

пластической деформации, как и при кратковременных испытаниях, описывается степенным уравнением.

При испытаниях на ползучесть и кратковременных испытаниях эффект деформационного

упрочнения разный. При одинаковой накопленной пластической деформации величина предела текучести в первом случае ниже, чем во втором.

Неустановившаяся стадия ползучести имеет две области: быстрого и медленного упрочнения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колбасников Н.Г., Кондратьев С.Ю. Структура. Энтропия. Фазовые превращения и свойства металлов. СПб: Наука, 2006. 363 с.

2. Колбасников Н.Г., Шукин С.В., Кондратьев С.Ю. Образование новых границ механизм релаксации внутренних напряжений // Известия АН СССР. Металлы. 1990. № 5. С. 86–91.

3. Чумаков Е.В., Жансеркеева З.А. Экспериментальные установки для изучения предела текучести и скорости ползучести на неустановившейся стадии // Вестник КазНТУ им. К. Сатпаева. 2008. № 4. С. 123–134.

4. Чумаков Е.В., Жансеркеева З.А. Исследование деформационного упрочнения металлов и сплавов на неустановившейся стадии ползучести // Вестник КазНТУ им. К. Сатпаева 2007. № 2. С. 82–86.

5. Чумаков Е.В., Жансеркеева З.А. Деформационное упрочнение алюминия и титана // Вестник КазАТК. 2008. № 3. С. 97–100.

6. Чумаков Е.В., Цой Д.Н., Жансеркеева З.А. Предел текучести как структурно чувствительный элемент // Труды Международной научно-практической конференции «Наука и инновации на железнодорожном транспорте». Алматы, КазАТК. 2007. Т. 8. С. 129–132.

#### REFERENCES

1. Kolbasnikov N.G., Kondratyev S.Yu. Struktura. Entropiya. Fazovyye prevrashcheniya i svoystva metallov. SPb: Nauka, 2006. 363 s. (rus.)

2. Kolbasnikov N.G., Shchukin S.V., Kondratyev S.Yu. Obrazovaniye novykh granits mekhanizm relaksatsii vnutrennikh napryazheniy. *Izvestiya AN SSSR. Metally*. 1990. № 5. S. 86–91. (rus.)

3. Chumakov Ye.V., Zhanserkeyeva Z.A. Eksperimentalnyye ustanovki dlya izucheniya predela tekuchesti i skorosti polzuchesti na neustanovivsheysya stadiya. *Vestnik KazNTU im. K. Satpayeva*. 2008. № 4. S. 123–134. (rus.)

4. Chumakov Ye.V., Zhanserkeyeva Z.A. Issledovaniye deformatsionnogo uprochneniya metallov i splavov na neustanovivsheysya stadii polzuchesti. *Vestnik KazNTU im. K. Satpayeva*. 2007. № 2. S. 82–86. (rus.)

5. Chumakov Ye.V., Zhanserkeyeva Z.A. Deformatsionnoye uprochneniye alyuminiya i titana. *Vestnik KazATK*. 2008. № 3. S. 97–100. (rus.)

6. Chumakov Ye.V., Tsoy D.N., Zhanserkeyeva Z.A. Predel tekuchesti kak strukturno chuvstvitelnyy element. *Trudy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Nauka i innovatsii na zheleznodorozhnom transporte»*. Almaty, KazATK. 2007. T. 8. S. 129–132. (rus.)

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**ЧУМАКОВ Евгений Васильевич** — кандидат физико-математических наук доцент кафедры материаловедения Казахского национального технического университета имени К.И. Сатпаева. 050013, Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22а. E-mail: chumakov.ev@mail.ru

#### AUTHOR

**CHUMAKOV Evgeniy V.** — Kazakh National Technical University named after K.I. Satpayev. 22. Satpayev Str. Almaty. 050013. Kazakhstan. E-mail: chumakov.ev@mail.ru