

УДК 620.172.216

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ СТАЛИ ЭК-181 ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА РАСТЯЖЕНИЕ КОЛЬЦЕВЫХ ОБРАЗЦОВ

© М. В. Леонтьева-Смирнова¹, И. Н. Измалков¹, И. Р. Валитов¹,
Л. П. Лошманов², А. В. Костюхина², П. В. Федотов²,
Г. Х. Мурзаханов³, А. В. Баскаков⁴

Статья поступила 18 декабря 2015 г.

Разработана и обоснована методика определения предела текучести материала (стали ЭК-181) оболочки твэла быстрого реактора. Предложено проводить механические испытания на растяжение кольцевых образцов высотой 2 мм на цилиндрических опорах диаметром 4 мм. В результате получают машинные диаграммы деформирования в координатах перемещение активного захвата испытательной машины — сила. Обработка машинных диаграмм деформирования позволяет определять значение условного предела текучести материала с допуском на остаточную деформацию 1,1 %.

Ключевые слова: сталь ЭК-181; оболочка твэла; механические испытания на растяжение; условный предел текучести; метод конечных элементов; суперкомпьютер; интенсивность напряжений; интенсивность деформаций; машинная диаграмма деформирования; истинная диаграмма деформирования.

Одной из задач дальнейшего развития быстрых реакторов является разработка и создание ядерной энергетики с замкнутым топливным циклом [1, 2]. На основе опыта успешной эксплуатации опытно-промышленного быстрого реактора с натриевым теплоносителем БН-600 [3] построен и введен в эксплуатацию быстрый реактор БН-800 и проектируется коммерческий быстрый реактор БН-1200 мощностью 1200 МВт [4]. Развитие быстрых реакторов в значительной степени определяется характеристиками конструкционных материалов элементов активных зон, в частности материалов оболочек тепловыделяющих элементов. В качестве материала оболочки твэла среди прочих рассматриваются жаропрочные легированные 12 %-ные хромистые стали, например сталь ЭК-181 (16X12В2ФТаР) [5]. Важными параметрами, влияющими на выбор конструкционного материала, являются его механические свойства. Цель данного исследования — разработка и обоснование методики определения предела текучести материала оболочки твэла быстрого реактора, которая состоит в проведении механических испытаний на растяжение кольцевых образцов высотой 2 мм на цилиндрических опорах диаметром 4 мм и последующей обработке получен-

ных экспериментальных машинных диаграмм деформирования. Метод обработки, проведенные экспериментальные и расчетные исследования, а также анализ имеющихся литературных данных позволяют рекомендовать методику определения величины условного предела текучести материала оболочки с допуском на остаточную деформацию 1,1 %.

В экспериментах использовали кольцевые образцы (высотой 2 мм) и патрубки (длина рабочей части 25 мм), вырезанные из оболочек твэлов $\varnothing 6,9 \times 6,1$ мм из стали ЭК-181 (термообработка закалка + отпуск). Химический состав стали, % масс.: 0,1 – 0,2 С; 0,3 – 0,5 Si; 0,5 – 0,8 Mn; 10,0 – 12,0 Cr; <0,1 Ni; <0,01 Mo; <0,01 Nb; 0,2 – 1,0 V; 0,003 – 0,006 В; 1,0 – 2,0 W; 0,03 – 0,3 Ti; 0,05 – 0,2 Та. Испытания проводили при комнатной температуре с использованием универсальной испытательной машины MTS Insight 100, соответствующей ГОСТ 28840–90. Нагружение кольцевых образцов выполняли посредством цилиндрических опор $\varnothing 4$ мм (рис. 1); скорость перемещения подвижной опоры — 1 мм/мин. Такой способ нагружения кольцевых образцов применяется при исследованиях конструкционных материалов атомной техники, например, для испытаний оболочек твэлов реакторов ВВЭР [6 – 8]. Испытания патрубков проводили согласно ГОСТ 10006–80 при скорости перемещения подвижного захвата 0,1 мм/мин. Отметим, что в данной работе, если не указано иное, использованы термины и определения ГОСТ 25.503–97, ГОСТ 10006–80, ГОСТ 1497–84.

¹ ОАО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А. А. Бочвара», Москва, Россия.

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия; e-mail: fpvpetr@rambler.ru

³ Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия.

⁴ Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С. П. Королёва, г. Самара, Россия.

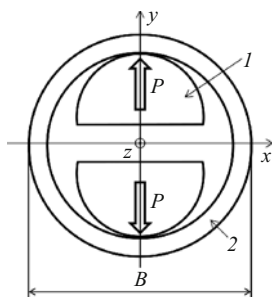


Рис. 1. Схема нагружения кольцевого образца: 1 — опора, 2 — образец

В результате испытаний кольцевых образцов получены машинные диаграммы деформирования в координатах перемещение активного захвата испытательной машины, опоры, (Δl) – сила (P). На рис. 2 представлены диаграммы растяжения четырех образцов. Эти диаграммы отличаются незначительно, что свидетельствует о стабильности механических свойств стали ЭК-181 и одинаковых геометрических параметрах испытанных кольцевых образцов.

На представленных зависимостях в области деформаций до 1,25 мм наблюдается гипертрофированный начальный участок, который при стандартных испытаниях обусловлен выбором зазоров в узле крепления образца, смятием микронеровностей контактных поверхностей, дополнительными упругими перемещениями, зависящими от жесткости испытательной машины и другими факторами; обычно он исключается из рассмотрения. Однако использованная в работе испытательная машина (жесткость 460 кН/мм, класс точности средства измерения 0,5) практически не вносит искажений в диаграмму деформирования, поскольку зазоры между опорами и образцами отсутствуют, что следует из схемы нагружения. Кроме того, готовые опоры нагружающего устройства шлифуются. Образцы для испытаний изготовлены из штатных оболочек твэлов, к качеству производства которых также предъявляются повышенные требования. С другой стороны, для нагружения кольца в упругой области по схеме, приведенной на рис. 1, существует аналитическое решение [9]. Согласно этому решению максимальное значение нормального напряжения в поперечном сечении кольцевого образца, образованном плоскостью XOZ , при перемещении подвижной опоры на 0,09 мм (усилие — 45 Н) составляет 526 МПа, что немного превышает предел текучести материала образца. Следовательно, искаженный участок диаграммы деформирования вызван пластическими деформациями образца и его нельзя исключать из рассмотрения.

Далее (в области деформаций от 1,25 до 1,5 мм) наблюдается линейный участок, однако его наличие не связано с упругой деформацией материала, а обусловлено распрямлением кольца. Окончательное его распрямление происходит при нагрузке, соответствующей окончанию линейного участка. Для иллюстрации процесса распрямления кольцевого образца проведены специальные испытания, при которых на-

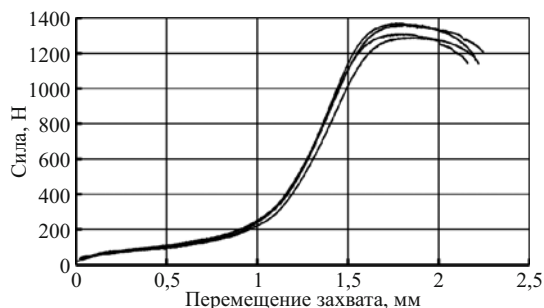


Рис. 2. Машинная диаграмма деформирования кольцевых образцов

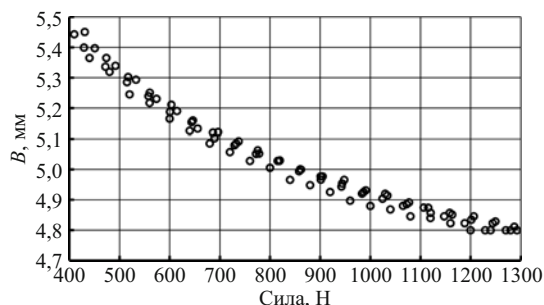


Рис. 3. Изменение расстояния между рабочими частями кольцевого образца при ступенчатом нагружении

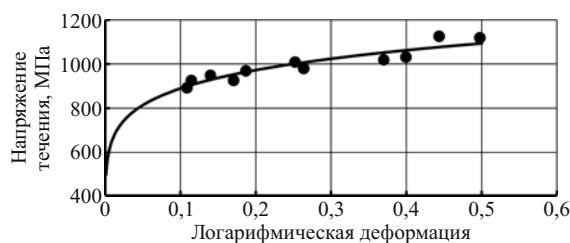


Рис. 4. Кривая упрочнения (кольцевые образцы): ● — эксперимент, сплошная линия — расчет по уравнению (1)

гружение осуществляли ступенчато с промежуточными разгрузками и измерением расстояния B (см. рис. 1). Приращение нагрузки между ступенями составляло 2 – 3 % от среднего значения P_{max} (1330 Н). Результаты проведенных исследований (рис. 3) свидетельствуют о наличии заметных пластических деформаций образца до достижения точки диаграммы, в которой при стандартном подходе определяется $P_{0,2}$. Таким образом, подтвержден вывод о невозможности исключения из рассмотрения искаженного участка диаграммы деформирования. Кроме того, по полученной машинной диаграмме деформирования невозможно определить характеристики прочности материала в области малых пластических деформаций стандартным способом.

Далее согласно ГОСТ 25.503–97 строили кривую упрочнения (рис. 4) в координатах напряжение течения (σ) – логарифмическая деформация (e). Под термином «напряжение течения» подразумевали отноше-

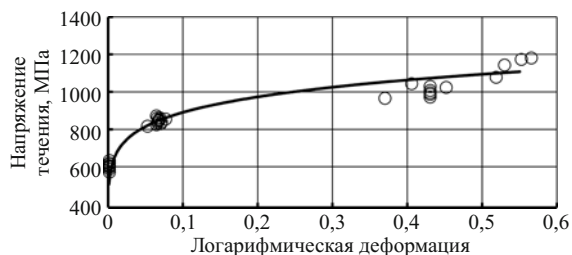


Рис. 5. Кривая упрочнения: \circ — эксперимент (патрубки), сплошная линия — расчет по уравнению (1) для кольцевых образцов

ние силы P к текущему значению суммарной площади F поперечного сечения кольцевого образца, образованного плоскостью XOZ , что фактически является осредненным по сечению значением σ_y . Логарифмическая деформация — логарифм отношения начальной площади поперечного сечения (F_0), образованного плоскостью XOZ , к ее текущему значению (F). Испытания проводили с промежуточными разгрузками и измерениями площади поперечного сечения. Полученная таким образом кривая упрочнения представляет собой истинную диаграмму деформирования [10].

В результате аппроксимации экспериментальных данных методом наименьших квадратов [11] (см. рис. 4) находили функциональную зависимость напряжения течения от величины логарифмической деформации [8, 12]:

$$\ln \sigma = \ln \sigma_{0,2} + m \ln (e/0,02), \quad (1)$$

где $\sigma_{0,2}$ — экстраполированный условный предел текучести, МПа; 0,002 — допуск на остаточную деформацию; m — степень упрочнения. В результате аппроксимации получены следующие значения коэффициентов уравнения (1): $\sigma_{0,2} = 524^{+51}_{-46}$ МПа; $m = 0,135^{+0,013}_{-0,013}$.

На рис. 5 приведены результаты, полученные на патрубках (поскольку испытания патрубков стандартные, машинные диаграммы деформирования и последовательность обработки данных не приведены), и кривая упрочнения для кольцевых образцов. Они практически совпадают, поэтому можно утверждать, что уравнение (1), полученное по результатам испытаний кольцевых образцов, является истинной диаграм-

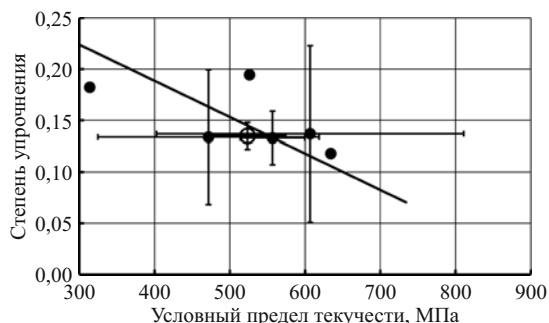


Рис. 6. Зависимость степени упрочнения от величины предела текучести: \bullet — данные работ [12 – 15], \circ — результаты исследований авторов

мой деформирования стали ЭК-181 и применимо во всем диапазоне изменения пластических деформаций. Следовательно, можно сделать вывод, что исследование кривой упрочнения с использованием кольцевых образцов ничем не отличается от такового для стандартных образцов.

Влияние видов обработки на механические свойства стали ЭК-181

В таблице приведены значения условных пределов текучести и степеней упрочнения стали ЭК-181 после различных видов обработки, взятые из работ [13 – 16], а также полученные в настоящей работе.

Анализ приведенных результатов показал:

1) термомеханическая обработка стали ЭК-181, приводящая к увеличению предела текучести, снижает степень упрочнения (рис. 6);

2) полученные в работе механические свойства стали ЭК-181 не противоречат имеющимся результатам (см. рис. 6), т.е. зависимость (1) является истинной диаграммой деформирования.

Расчетное моделирование

Для исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) кольцевого образца при растяжении на цилиндрических опорах проведено расчетное моделирование с помощью конечно-элементного программного комплекса ANSYS 14.0 на суперкомпьютере «Сергей Королёв» (Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С. П. Королёва).

Влияние видов обработки на механические свойства

№	Режим обработки	$\sigma_{0,2}$	m
1	Отжиг [13]	314	0,182
2	Закалка + старение [13 – 16]	472 ± 147	0,134 ± 0,066
3	Закалка + ультразвуковая обработка [13]	526	0,195
4	Закалка [13, 16]	557 ± 43	0,133 ± 0,026
5	Закалка + старение + ультразвуковая обработка [13, 14, 16]	607 ± 204	0,137 ± 0,086
6	Ультразвуковая обработка [16]	634	0,118
7	Закалка + отпуск (настоящая работа)	524 ⁺⁵¹ ₋₄₆	0,135 ^{+0,013} _{-0,013}

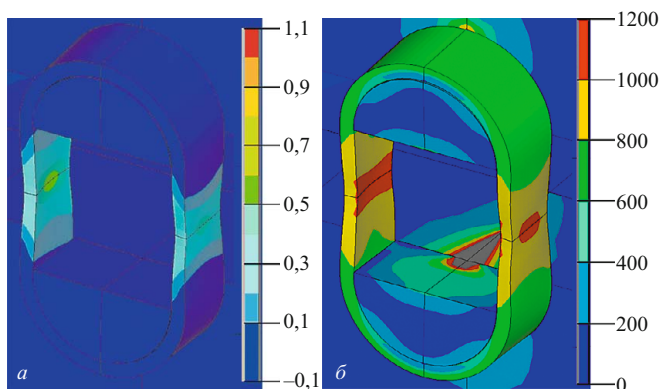


Рис. 7. Интенсивности деформаций (а) и напряжений (б) образца при перемещении захвата 2,2 мм

Для расчетов задавали геометрические характеристики и свойства образца и опор [17 – 19]. В качестве обобщенной диаграммы деформирования [20] использовали уравнение (1) и полученные выше его коэффициенты $\sigma_{0,2}$ и m . Моделирование выполняли с помощью трехмерного (объемного) восьмиузлового твердотельного элемента, имеющего три степени свободы в каждом узле SOLID 185. Этот элемент поддерживает контактное взаимодействие, большие перемещения, большие деформации, а также все необходимые для подобного рода моделирования свойства материалов. Для повышения точности расчета учитывали влияние эффекта Баушингера [21]. Для уменьшения размерности задачи и увеличения скорости счета вычисляли НДС левой верхней четверти кольца с захватом (см. рис. 1) с соответствующими граничными условиями. Расчеты проводили при разбиении четверти кольца на 7200 элементов. При таком разбиении решение сходится и дальнейшее увеличение дискретизации задачи не имеет смысла. Пример расчета НДС образца приведен на рис. 7.

При анализе результатов расчетов под термином сила (P) подразумевается удвоенная сумма проекций на ось Y всех узловых усилий в поперечном сечении кольцевого образца, образованном плоскостью XOZ (см. рис. 1). Напряжение течения представляет собой отношение силы (P) к удвоенному значению текущей площади поперечного сечения кольцевого образца, образованного плоскостью XOZ . Логарифмическая деформация вычисляется как логарифм отношения начальной площади поперечного сечения кольцевого образца, образованного плоскостью XOZ (см. рис. 1), к ее текущему значению.

В результате моделирования получена расчетная диаграмма деформирования (рис. 8). Результаты расчетов совпали с экспериментальными данными. Такое совпадение еще раз подтвердило, что кривая 1 является истинной диаграммой деформирования стали ЭК-181.

Кроме того, в результате расчетов НДС получены зависимости осредненных по площади сечения образца, образованного плоскостью XOZ , интенсивностей

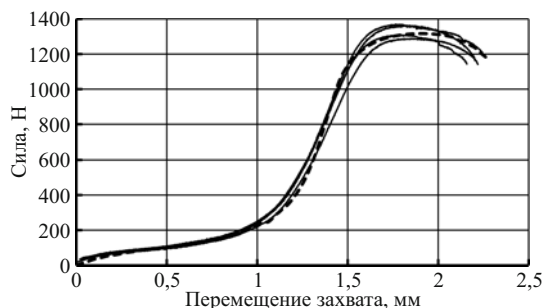


Рис. 8. Диаграмма деформирования: сплошная линия — эксперимент; пунктирная линия — расчет

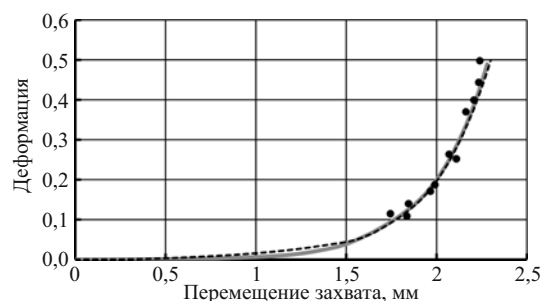


Рис. 9. Зависимость деформации от перемещения захвата: сплошная линия — логарифмическая деформация; пунктирная линия — осредненная интенсивность деформаций; ● — эксперимент

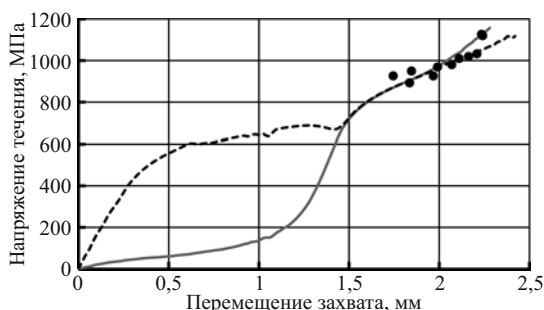


Рис. 10. Зависимость напряжения от перемещения захвата: сплошная линия — напряжение течения; пунктирная линия — осредненная интенсивность напряжений; ● — эксперимент

напряжений и деформаций от перемещения захвата, а также зависимости логарифмической деформации и напряжения течения от перемещения захвата (рис. 9, 10). Осредненная по сечению интенсивность напряжений — отношение суммы интенсивностей напряжений (по Мизесу [20]) в узлах, умноженных на соответствующие им площади, к площади поперечного сечения. Осредненная по сечению интенсивность пластических деформаций — отношение суммы интенсивностей пластических деформаций (по Мизесу [20]) в узлах, умноженных на соответствующие им площади, к площади поперечного сечения.

Из приведенных на рис. 8, 9 данных видно, что после распрямления кольца (при перемещении захвата

более 1,5 мм) значение логарифмической деформации практически совпадает с осредненной по сечению интенсивностью деформации. Напряжение течения, которое, по сути, является осредненным по сечению значением σ_y , совпадает с осредненной по сечению интенсивностью напряжений. Небольшое расхождение напряжений в области больших пластических деформаций (при перемещении захвата более 2 мм) обусловлено локализацией деформации в области шейки и, следовательно, трехосным напряженным состоянием. Проведенные расчеты совпадают с экспериментальными данными и подтверждают сделанное выше заключение, что исследование кривой упрочнения с использованием кольцевых образцов ничем не отличается от такового для стандартных образцов, за исключением области, предшествующей распрямлению кольцевого образца.

Анализ машинных диаграмм деформирования

Кроме исследования кривой упрочнения, практический интерес представляет возможность извлечения данных о характеристиках прочности непосредственно из машинных диаграмм деформирования. Особенно это касается определения условного предела текучести с некоторым допуском на остаточную деформацию. Как отмечено выше, на машинных диаграммах деформирования в области деформаций от 1,25 до 1,5 мм наблюдается линейный участок и его наличие обусловлено распрямлением кольца. Окончательное его распрямление происходит при нагрузке, соответствующей окончанию линейного участка, т.е. к моменту распрямления кольца накапливаются значительные пластические деформации. Следовательно, говорить о привычных допусках на остаточную деформацию (0,05 или 0,2 %) не приходится. Однако вполне возможно определять предел текучести с большим допуском на остаточную деформацию. Для этого на диаграмме деформирования необходимо выбрать характерную точку, которую можно легко идентифицировать, например нагрузку (P_0), соответствующую окончанию линейного участка (распрямлению кольца). Для приведенных диаграмм деформирования $P_0 = 1041 \pm 43$ Н. Величину логарифмической деформации при распрямлении кольца обозначим e_0 . Следовательно, напряжение течения, соответствующее распрямлению кольца, можно вычислить по формуле

$$\sigma_0 = \frac{P_0}{F_0} \exp(e_0), \quad (2)$$

откуда, учитывая зависимость (1), получим

$$\ln \frac{P_0}{F_0} + e_0 = \ln \sigma_{0,2} + m \ln \frac{e_0}{0,002}. \quad (3)$$

Решением уравнения (3) является $e_0 = 0,011$.

Следовательно, для кольцевого образца окончанию линейного участка диаграммы деформирования соответствует напряжение течения $\sigma_{1,1}$ при деформации 0,011.

Таким образом, в результате проведенных экспериментальных и расчетных исследований, а также анализа имеющихся литературных данных предложена методика определения условного предела текучести материала оболочки по результатам испытаний кольцевых образцов на растяжение в диаметральном направлении с допуском на остаточную деформацию 0,011. Для этого предложено проводить испытания на растяжение кольцевых образцов высотой 2 мм на цилиндрических опорах диаметром 4 мм (см. рис. 1). В результате таких испытаний получают машинные диаграммы деформирования в координатах перемещение активного захвата испытательной (опоры) (Δl) – сила (P) (см. рис. 2). По полученной диаграмме определяют точку окончания линейного участка, которой соответствует нагрузка $P_{1,1}$. Отношение $P_{1,1}$ к исходной площади поперечного сечения образца дает значение условного предела текучести материала с допуском на остаточную деформацию 0,011.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стратегия развития атомной энергетики России в первой половине XXI в. — М.: ФГУП «ЦНИИ атоминформ», 2001.
2. Федеральная целевая программа «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010 – 2015 гг. и на перспективу до 2020 г.». — М.: Энергоатомиздат, 2009.
3. Сараев О. М., Ошканов Н. Н., Зродников А. В. и др. Опыт эксплуатации и перспективы дальнейшего развития быстрых натриевых реакторов / Атомная энергия. 2010. Т. 108. Вып. 4. С. 191 – 197.
4. Рачков В. И., Поплавский В. М., Цибуля А. М. и др. Концепция перспективного энергоблока с натриевым реактором БН-1200 / Атомная энергия. 2010. Т. 108. Вып. 4. С. 201 – 206.
5. Целищев А. В., Агеев В. С., Буданов Ю. П. и др. Разработка конструкционной стали для твэлов и ТВС быстрых натриевых реакторов / Атомная энергия. 2010. Т. 108. Вып. 4. С. 217 – 222.
6. Кобылянский Г. П., Новоселов А. Е. Радиационная стойкость циркония и сплавов на его основе: справочные материалы по реакторному материаловедению / Под ред. В. А. Цыканова. — Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 1996. — 176 с.
7. Федотов П. В., Костюхина А. В., Лошманов Л. П. Влияние нейтронного облучения на поверхность течения сплава Э110 / Ядерная физика и инжиниринг. — 2013. Т. 4. № 8. С. 689 – 694.
8. Измалков И. Н., Лошманов Л. П., Костюхина А. В. Механические свойства сплава Э110 при температурах до 1273 К / Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2013. № 2. С. 64 – 70.
9. Прочность, устойчивость, колебания: Справочник в 3 томах / Под ред. И. А. Биргера и Я. Г. Пановко. Том 1. — М. Машиностроение, 1968. — 323 с.
10. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. В 2 частях. Изд. 3-е, перераб. и доп. Ч. 2. — М.: Машиностроение, 1974. — 368 с.
11. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. В 2 томах. Т. 1 / Пер. с англ. Ю. П. Адлера, В. Г. Горского. — М.: Финансы и статистика, 1986. — 369 с.
12. Третьяков А. В., Трофимов Г. К., Курьянова М. К. Механические свойства сталей и сплавов при пластическом деформировании. Карманный справочник. — М.: Машиностроение, 1971. — 64 с.
13. Панин А. В., Леонтьева-Смирнова М. В., Чернов В. М., Панин В. Е., Почивалов Ю. И., Мельникова Е. А. Повышение прочностных характеристик конструкционной стали ЭК-181 на основе многоуровневого подхода физической мезомеханики / Физическая мезомеханика. 2007. Т. 10. № 4. С. 73 – 86.
14. Панин А. В., Перевалова О. Б., Сиякова Е. А., Почивалов Ю. И., Леонтьева-Смирнова М. В., Чернов В. М. Влияние ультразвуковой обработки на эволюцию микроструктуры фер-

- ритно-мартенситной стали в процессе механического нагружения. I. Зона однородной деформации / Физика и химия обработки материалов. 2011. № 4. С. 83 – 91.
15. **Панин А. В., Ветова Н. А., Сinyaкова Е. А.** Влияние облучения ионными пучками Zr^{+} на структуру и механические свойства стали ЭК-181 / Современные техника и технологии: сборник трудов XVIII международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Т. 3. — Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2012. С. 337 – 338.
 16. **Панин А. В., Мельникова Е. А., Превалова О. Б., Почивалов Ю. И., Леонтьева-Смирнова М. В., Чернов В. М., Иванов Ю. Ф.** Формирование нанокристаллической структуры в поверхностных слоях стали ЭК-181 в процессе ультразвуковой обработки / Физическая мезомеханика. 2009. Т. 12. № 2. С. 83 – 93.
 17. **Леонтьева-Смирнова М. В., Агафонов А. Н., Ермолаев Г. Н. и др.** Микроструктура и механические свойства малоактивируемой ферритно-мартенситной стали ЭК-181 (RUSFER-EK-181) / Перспективные материалы. 2006. № 6. С. 40 – 52.
 18. **Третьяков А. В., Зизин В. И.** Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. 2-е изд. — М.: Metallurgiya, 1973. — 224 с.
 19. **Крагельский И. В., Виноградова И. Э.** Коэффициенты трения: Справочное пособие. — М.: Mashgiz, 1962. — 220 с.
 20. **Морозов Е. М., Муйземнек А. Ю., Шадский А. С.** ANSYS в руках инженера. Механика разрушения. — М.: ЛЕНАНД, 2010. — 456 с.
 21. **Котов А. Г.** САПР изделий из композиционных материалов. Моделирование процессов деформирования и разрушения в среде ANSYS: учебное пособие. — Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. — 351 с.
 9. **Birger I. A., Panovko Ya. G.** (eds.). Prochnost', ustoychivost', kolebaniya: Spravochnik [Strength, stability, fluctuation: reference book]. In 3 vols. Vol. 1. — Moscow: Mashinostroenie, 1968. — 323 p. [in Russian].
 10. **Fridman Ya. B.** Mekhanicheskie svoystva metallov [Mechanical properties of metals]. In 2 parts. 3rd Edition. Part 2. — Moscow: Mashinostroenie, 1974. — 368 p. [in Russian].
 11. **Draper N., Smith G.** Prikladnoi regressionnyi analiz [Applied Regression Analysis]. In 2 vols. Vol. 1. — Moscow: Finansy i statistika, 1986. — 369 p. [Russian translation].
 12. **Tret'yakov A. V., Trofimov G. K., Kur'yanova M. K.** Mekhanicheskie svoystva staley i splavov pri plasticheskom deformirovanii. Karmannyi spravochnik [The mechanical properties of steels and alloys during plastic deformation: reference pocketbook]. — Moscow: Mashinostroenie, 1971. — 64 p. [in Russian].
 13. **Panin A. V., Leont'eva-Smirnova M. V., Chernov V. M., Panin V. E., Pochivalov Yu. I., Mel'nikova E. A.** Povyshenie prochnostnykh kharakteristik konstruksionnoi stali EK-181 na osnove mnogourovnevnogo podkhoda fizicheskoi mezomekhaniki [Increase strength characteristics of structural steel EK-181 on the basis of a tiered approach physical mesomechanics] / Fiz. Mezomekh. 2007. Vol. 10. N 4. P. 73 – 86 [in Russian].
 14. **Panin A. V., Perevalova O. B., Sinyakova E. A., Pochivalov Yu. I., Leont'eva-Smirnova M. V., Chernov V. M.** Vliyaniye ul'trazvukovoi obrabotki na évol'yutsiyu mikrostruktury ferritno-martensitnoi stali v protsesse mekhanicheskogo nagruzheniya. I. Zona odnorodnoi deformatsii [Effect of ultrasonic treatment on the microstructure evolution ferritic-martensitic steel during mechanical loading. I. Homogeneous deformation zone] / Fiz. Khim. Obrab. Mater. 2011. N 4. P. 83 – 91 [in Russian].
 15. **Panin A. V., Vetova N. A., Sinyakova E. A.** Vliyaniye obluчениya ionnymi puchkami Zr^{+} na strukturu i mekhanicheskie svoystva stali EK-181 [Effect of ion beam irradiation Zr^{+} on structure and mechanical properties of steel EK-181] / Sovremennye tekhnika i tekhnologii: sbornik trudov XVIII mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchennykh [Modern equipment and technology: a collection of the works of the XVIII Int. Sci.-Pract. Conf. of students, graduate students and young scientists]. Vol. 3. — Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo Politekh. Univ., 2012. P. 337 – 338 [in Russian].
 16. **Panin A. V., Mel'nikova E. A., Prevalova O. B., Pochivalov Yu. I., Leont'eva-Smirnova M. V., Chernov V. M., Ivanov Yu. F.** Formirovaniye nanokristallicheskoi struktury v poverkhnostnykh sloyakh stali EK-181 v protsesse ul'trazvukovoi obrabotki [The formation of a nanocrystalline structure in the surface layers of the EK-181 during sonication] / Fiz. Mezomekh. 2009. Vol. 12. N 2. P. 83 – 93 [in Russian].
 17. **Leont'eva-Smirnova M. V., Agafonov A. N., Ermolaev G. N., et al.** Mikrostruktura i mekhanicheskie svoystva maloaktiviruemoi ferritno-martensitnoi stali EK-181 (RUSFER-EK-181) [The microstructure and mechanical properties of low activation ferritic-martensitic steel EK-181 (RUSFER-EK-181)] / Perspekt. Mater. 2006. N 6. P. 40 – 52 [in Russian].
 18. **Tret'yakov A. V., Zizin V. I.** Mekhanicheskie svoystva metallov i splavov pri obrabotke davleniem [The mechanical properties of metals and alloys by pressure treatment]. 2nd Edition. — Moscow: Metallurgiya, 1973. — 224 p. [in Russian].
 19. **Kragel'skii I. V., Vinogradova I. É.** Koéffitsienty treniya: Spravochnoe posobie [The coefficients of friction. Reference Guide]. — Moscow: Mashgiz, 1962. — 220 p. [in Russian].
 20. **Morozov E. M., Muizemnek A. Yu., Shadskii A. S.** ANSYS v rukakh inzhenera. Mekhanika razrusheniya [ANSYS in the hands of the engineer. Fracture mechanics]. — Moscow: LENAND, 2010. — 456 p. [in Russian].
 21. **Kotov A. G.** SAPR izdelii iz kompozitsionnykh materialov. Modelirovaniye protsessov deformirovaniya i razrusheniya v srede ANSYS: uchebnoe posobie [CAD products made of composite materials. Modeling of deformation and fracture in ANSYS environment: tutorial]. — Perm': Izd-vo Perm. Gos. Tekhn. Univ., 2008. — 351 p. [in Russian].

REFERENCES