

**ВЛИЯНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ПОЖАРА НА ИЗМЕНЕНИЕ
МИКРОСТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЛИ 20**

УДК 620.186.12

**INFLUENCE OF FIRE EFFECT ON MICROSTRUCTURE CHANGES
AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF STEEL 20****Е.А. Наумкин, М.И. Кузеев,
В.В. Белозеров, Р.Р. Кудашев**
ФГБОУ ВПО Уфимский
государственный нефтяной
технический университет**E.A. Naumkin, M.I. Kuzeev,
V.V. Belozеров, R.R. Kudashev**
FSBEI Ufa state petroleum technical
university

В результате проведенных экспериментальных исследований было изучено влияние скорости охлаждения материала (стали 20) при имитации условий пожара и его тушения на параметры микроструктуры, критический коэффициент концентрации напряжения и порог хладноломкости.

Resulting from the conducted experimental studies, main regularities determining relationship between rate of cooling of material (steel 20) and microstructure characteristics, fracture toughness, cold-shortness in fire imitation and fire fighting.

Ключевые слова: микроструктура, механические характеристики, коэффициент концентрации напряжений, порог хладноломкости, напряженно-деформированное состояние, пластическая деформация, дефект.

Key words: microstructure, mechanical characteristics, fracture toughness, cold-shortness, stress-strain state, plastic strain, defect.

В настоящее время проблема возникновения аварий на установках нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств остается актуальной. Как правило, аварии сопровождаются пожарами, которые являются причиной возникновения высоких температурных нагрузок. Тушение пламени вызывает охлаждение локальных участков оборудования, при этом остальная часть находится под воздействием высокой температуры, что влечет за собой повышение напряженного состояния материала.

В большинстве случаев после ликвидации пожаров, видимые изменения металла оборудования отсутствуют. Однако под воздействием высоких температур вследствие пожаров и охлаждения при их тушении происходят изменения механических характеристик и микроструктуры металла оборудования. Так как условия тушения пожара различны, то и скорости охлаждения нагретого металла отличаются. В результате этого при нагреве металл оборудования находится в напряженно-деформированном состоянии, которое влияет на изменение механических характеристик. В зависимости от скорости охлаждения металла и напряженно-деформированного состояния изменения его механических характеристик и микроструктуры могут отличаться [1,2].

Согласно действующим на данный момент нормативам [3] время действия открытого пламени τ_0 , которое не приводит к изменению несущей способности конструкции, составляет 15 минут. Металлоконструкции с начального момента возникновения пожара подвергаются воздействию пламени с широким диапазоном температуры нагрева от 450 °С до 1100 °С [4]. В данной работе выбрана средняя температура нагрева металла, имитирующая реальные условия пожара, равная 650 °С. Данное значение не превышает линию эвтектоидного превращения, которая обеспечивает неизменность фазового состава стали (727 °С) и гарантирует сохранение прочностных характеристик и функционирование металлоконструкций.

Различные способы тушения пожаров могут по-разному влиять на скорость охлаждения металла [5]. В связи с этим актуально рассмотрение модели пожара при непродолжительном горении, когда система пожаротушения обеспечивает локализацию очагов возгорания. При этом представляет интерес изучение влияния скорости охлаждения конструкции на изменение микроструктуры и прочностные характеристики материала.

Напряженно-деформированное состояние металлоконструкций в момент нагрева определяется неравномерным температурным полем и, в зависимости от реальной конфигурации системы, в некоторых узлах могут возникать пластические деформации.

Уровень накопленных повреждений в конструкционных материалах на момент возникновения пожара может различаться в зависимости от уровня и характера рабочих нагрузок. Так, например, в оборудовании, которое испытывает циклические нагрузки, уже в процессе эксплуатации могут зарож-

даться дефекты типа трещин [6]. Эти дефекты могут получить развитие в процессе нестационарного нагружения при воздействии огня или агентов для его тушения, либо подрасти до критических размеров и раскрыться в дальнейшем при рабочих нагрузках.

В этой связи важно знать возможное изменение коэффициента трещиностойкости (K_{IC}) при различных скоростях охлаждения для оценки возможного распространения трещин и для подбора оптимальных условий охлаждения [6]. Исследование металла в условиях циклического нагружения показывают чувствительность K_{IC} к уровню накопленных повреждений [7].

Основная часть оборудования нефтяной и газовой промышленности эксплуатируется на открытом воздухе, поэтому важным параметром материала является порог хладноломкости, характеризующийся при понижении температуры сменой механизма разрушения стали с вязкого на хрупкий. Хрупкое разрушение не сопровождается существенной пластической деформацией и приводит к катастрофическому развитию протяженных трещин. Поэтому достаточный уровень трещиностойкости должен сохраняться как при нормальной, так и при пониженной температурах. Хрупкое разрушение стали явилось причиной многочисленных аварий, таких, как неожиданные прорывы трубопроводов, взрывы сосудов давления и складских резервуаров, обвалы мостов. Ранее проведенные исследования показали, что в процессе длительной эксплуатации порог хладноломкости материала оборудования смещается в сторону положительных температур, что делает невозможным дальнейшую эксплуатацию оборудования. В связи с этим необходимо знать, как происходит изменение порога хладноломкости металла в результате пожара, нагрева и тушения оборудования [2, 8].

В качестве исследуемого материала в данной работе использовалась сталь 20, которая широко применяется в нефтяной и газовой промышленности при изготовлении оборудования, труб и многих строительных металлоконструкций. Было подготовлено 9 пластин размером 300×300 мм, 4 из которых испытывались воздействием открытого пламени в свободном состоянии, а еще 4 в условиях стесненной деформации. Изменения свойств стали в процессе эксперимента вели по изменению среднего размера зерна. Определение критического коэффициента интенсивности напряжений выполнено по ГОСТ 25.506-85 на образцах типа 3 с краевым надрезом на разрывной машине ИР 5113-100 [9, 10], которые показаны на рисунке 1.

Порог хладноломкости определялся методом Иоффе-Давыденкова на плоских образцах в криогенной камере. Эксперименты проводились при температурах -20°C , -60°C и $+20^{\circ}\text{C}$. Определение

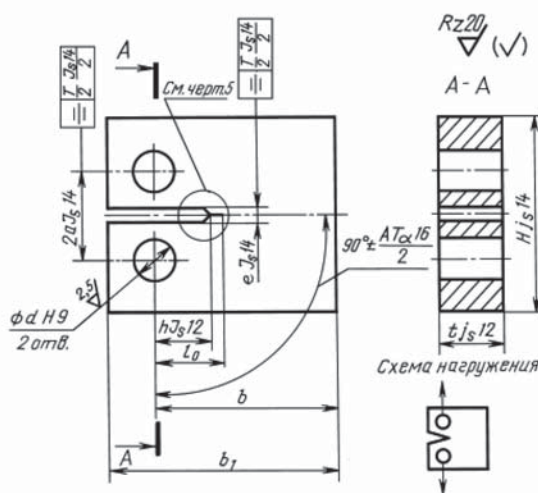


Рисунок 1. Компактный образец [10] для испытаний на внецентренное растяжение-сжатие

механических характеристик производилось по ГОСТ 1497-84 [10].

После 15 минутного нагрева и достижения необходимой температуры охлаждение металла проводилось в следующих условиях: на воздухе при $t=+20^{\circ}\text{C}$; на воздухе при $t=-20^{\circ}\text{C}$; в воде при $t=15^{\circ}\text{C}$; в масле при $t=15^{\circ}\text{C}$.

Подвергнутые таким образом термической обработке пластины были разделены на две части, одна из которых была направлена на исследование микроструктуры, а другая на изготовление образцов для определения механических характеристик.

Проведение эксперимента по нагреву металла с созданием напряженно-деформированного состояния осуществлялось в специально изготовленной конструкции, приведённой на рисунке 2.

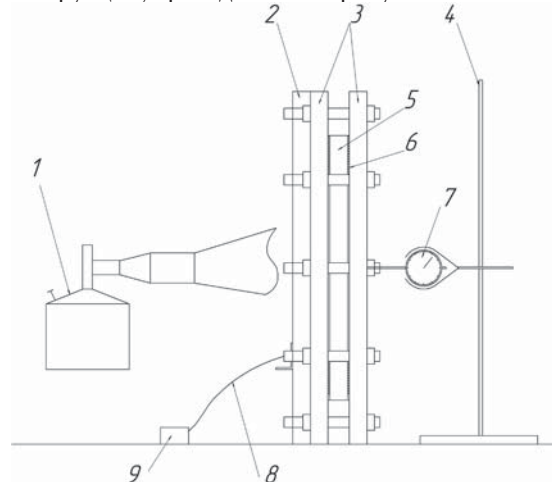


Рисунок 2. Схема экспериментального стенда для проведения исследований

1 – паяльная лампа (источник открытого пламени); 2 – защитный экран; 3 – фланцы; 4 – штатив с держателем; 5 – пластина (испытываемый образец); 6 – асбестовая прокладка; 7 – индикатор перемещений часового типа; 8 – термометр марки ТХА; 9 – измеритель-регулятор одноканальный ТРМ1А

На рисунке 3 представлены фото экспериментального стенда.

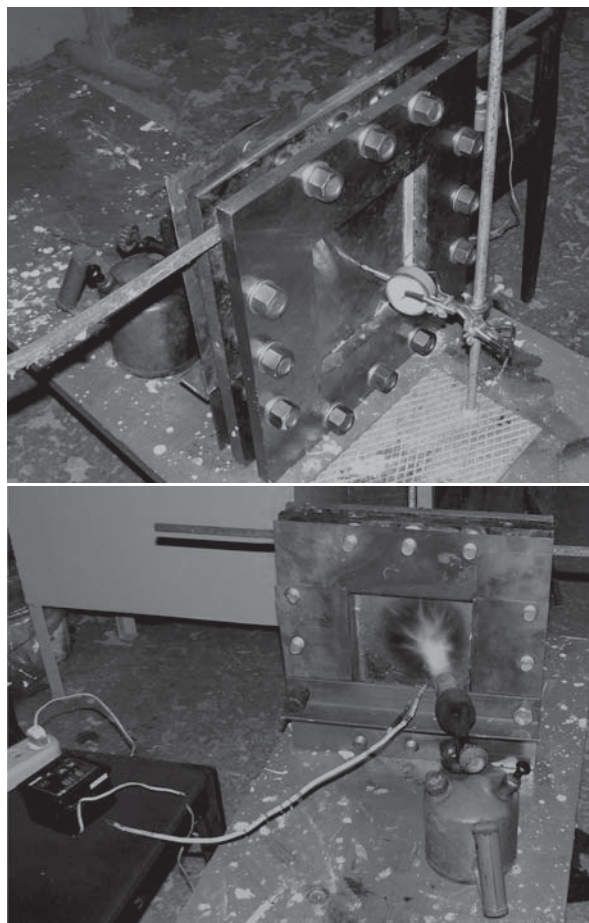


Рисунок 3. Экспериментальный стенд

Пластина для нагрева 5 зажималась фланцами 3 для ограничения ее температурных деформаций в горизонтальном и вертикальном направлениях (рисунок 2). В целях исключения нагрева фланцев открытым пламенем предусмотрено наличие защитных экранов 2. Во избежание контактного нагрева фланцев 3 от пластины 5 между ними предусмотрена прокладка из асбеста 6. Разогрев пластины до температуры 650 °С осуществлялся паяльной лампой 1. Температура нагрева пластины измерялась с помощью термопары 8 марки ТХА и измерителя-регулятора одноканального 9 марки ТРМ1А. Радиальная деформация, возникающая при нагреве пластины, оценивалась индикатором перемещений часового типа 7, закрепленного в штативе 4.

Пластины в закрепленном состоянии охлаждались при различных условиях, описанных выше. Результаты расчета скорости охлаждения представлены в таблице 1.

Таблица 1. Температурные параметры испытаний

Условие охлаждения	Начальная температура, °С	Конечная температура, °С	Время охлаждения, мин	Средняя скорость охлаждения, °С/мин
На воздухе при температуре +20°С	650	36	585	1
На воздухе при температуре -20°С	650	50	75	8
В масле с температурой +15°С	650	62	10	56
В воде с температурой +15°С	650	30	2	310

Максимальные деформации в пластине во время нагрева возникают в центральной части зоны нагрева и составляют 3,5 мм. После охлаждения пластины остаточных деформаций в металле не наблюдалось.

Из каждой пластины были вырезаны образцы для проведения металлографических исследований. В связи с тем, что направление проката оказывает влияние на структуру, исследования были проведены с трех плоскостей образцов. Схема вырезки с указанием направления проката пластины и номера поверхности указаны на рисунке 4 (пламя было направлено на плоскость 1).

Номеру I соответствует поверхность верхней части пластины, номеру II – поверхность, расположенная поперек направления проката, номеру III – поверхность, расположенная вдоль проката. Образцы, нагретые в свободном состоянии, были вырезаны по аналогичной схеме.

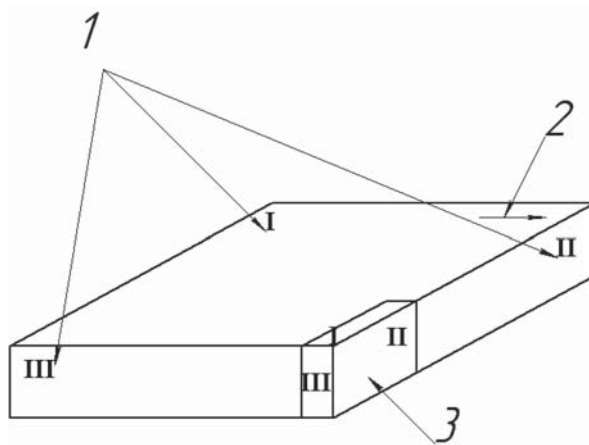


Рисунок 4. Схема вырезки образца для металлографического исследования

1 – номер поверхности; 2 – направление проката; 3 – образец

Каждая сторона пластины была подвергнута шлифованию и полированию до получения зеркальной поверхности и протравливалась раствором азотной кислоты и этилового спирта (5%-ное содержание азотной кислоты).

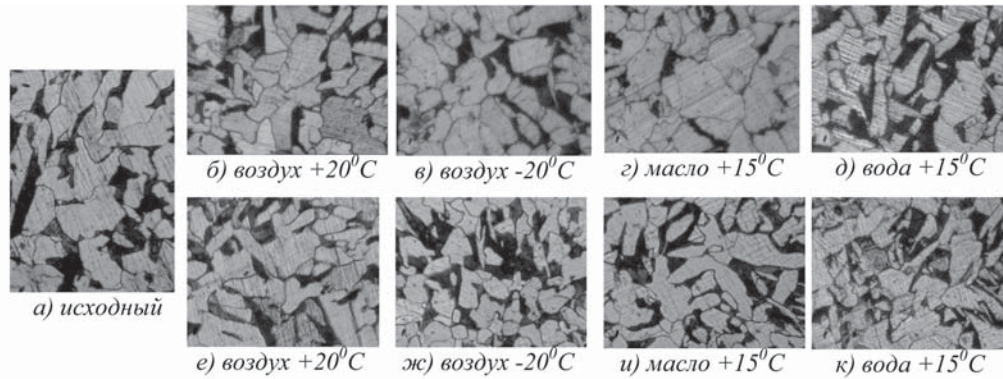


Рисунок 5. Микроструктура поверхности металла при различной скорости охлаждения
а – исходный образец; б, в, г, д – термическая обработка в свободном состоянии; е, ж, и, к – термическая обработка в закрепленном состоянии

Металлографические снимки с каждой поверхности были получены на микроскопе METAM PV-21. В качестве иллюстрации на рисунке 5 представлены снимки микроструктуры поверхностей образцов с различными условиями охлаждения.

Обработка металлографических снимков осуществлялась с помощью программы SIAMS 600. По полученным данным построены зависимости значений среднего размера зерна от скорости охлаждения, которые представлены на рисунках 6, 7 и 8.

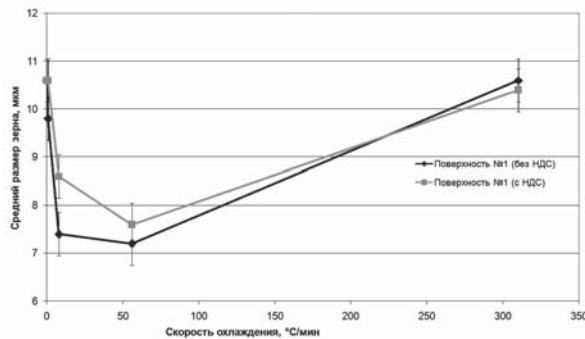


Рисунок 6. Зависимости среднего размера зерна для поверхности I от скорости охлаждения

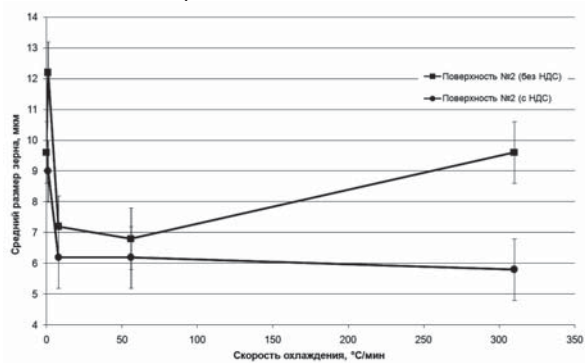


Рисунок 7. Зависимости среднего размера зерна для поверхности II от скорости охлаждения

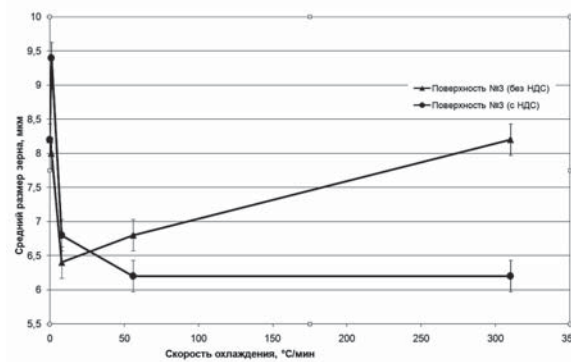


Рисунок 8. Зависимости среднего размера зерна для поверхности III от скорости охлаждения

Анализ зависимостей на рисунках 6, 7, 8 показывает, что характер изменения среднего размера зерна от скорости охлаждения системы идентичен для всех исследованных образцов. Однако из-за стесненности деформации по толщине металла имеются некоторые отличительные особенности.

Это связано с влиянием анизотропии проката при его изготовлении. На поверхности №1 напряженно-деформированное состояние, вызванное температурными воздействиями, оказывает незначительные изменения, по сравнению с ненагруженным состоянием. На этой поверхности наблюдается уменьшение среднего размера зерна при скоростях охлаждения 1°С/мин, 8°С/мин и 56°С/мин, а затем рост при скорости 310°С/мин. Поскольку температура нагрева пластины равна 650°С выше температуры рекристаллизации, которая для стали 20 равна 450°С, то нагрев пластины находится в области первичной рекристаллизации. В этой области происходит образование равноосных зерен, отличающихся от зерен исходной структуры [11]. Как известно, содержание Ni и Mn в углеродистых сталях способствуют измельчению размера зерна. Однако при уменьшении скорости рекристаллизации число центров кристаллизации увеличивается, что способ-

ствует образованию мелкозернистой структуры стали. При увеличении скорости рекристаллизации число центров кристаллизации уменьшается, и структура металла становится крупнозернистой [11]. Однако данная поверхность является наиболее опасной. А поверхности №2 и №3 не характеризуются ростом среднего размера зерна в условиях жесткого закрепления при повышении скорости охлаждения. В результате обработки диаграмм и расчета значений K_{IC} была построена зависимость критического коэффициента концентрации напряжений от скорости охлаждения (рисунок 9).

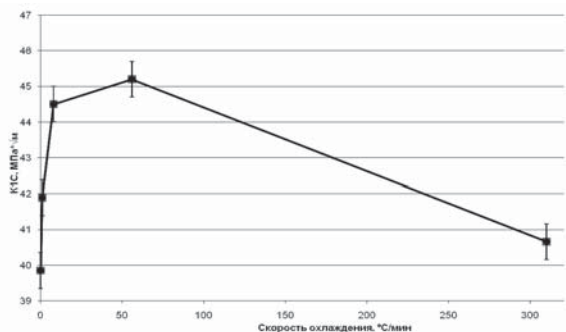


Рисунок 9. Зависимость изменения критического коэффициента концентрации напряжений от скорости охлаждения

Зависимость K_{IC} от скорости охлаждения показывает, что при небольших скоростях охлаждения от 0 до 56°С/мин (соответствующей охлаждению в масле) происходит равномерное увеличение K_{IC} , то есть повышение стойкости к дальнейшему развитию трещины, а при скоростях охлаждения от 56°С/мин до 310°С/мин (соответствующей охлаждению в воде) происходит равномерное уменьшение значения K_{IC} и при 310°С/мин практически соответствует значению K_{IC} исходного материала. Характер данной зависимости коррелирует с изменениями среднего размера зерна.

Таким образом, исследования показывают очевидность влияния условий пожара и его тушения на параметры микроструктуры и критический коэффициент концентрации напряжений. При увеличении скорости охлаждения от 1 до 56°С/мин на лицевой стороне проката листа из стали 20 происходит уменьшение среднего размера зерна вследствие процессов, происходящих в области первичной рекристаллизации. Уменьшение среднего размера зерна повлекло за собой увеличение значения критического коэффициента интенсивности напряжений на участке 1-56°С/мин. Это говорит о том, что стойкость к дальнейшему распространению усталостных трещин на этом участке скоростей охлаждения возрастает.

По методике Иоффе-Давыденкова, для определения порога хладноломкости получены точки пере-

сечения зависимостей предела текучести и условного сопротивления отрыву от температуры. На рисунке 10 показан рост порога хладноломкости с увеличением скорости охлаждения.

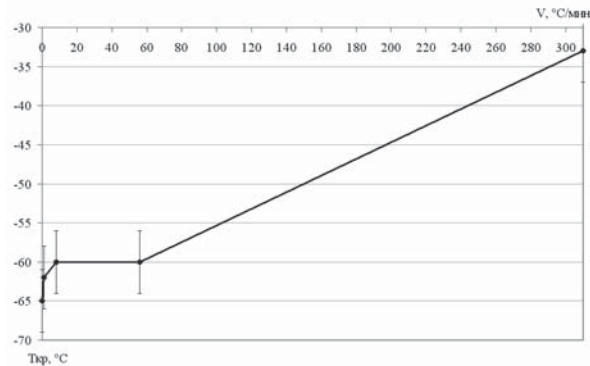


Рисунок 10. Зависимость порога хладноломкости от скорости охлаждения

Резкий скачок данного параметра при скорости охлаждения 310°С/мин объясняется следующими факторами: пластина из стали 20 после проката имеет технологические дефекты; в зоне первичной кристаллизации дефекты типа дислокаций способны к объединению и образованию микротрещин [7]; нагрев и быстрое охлаждение способствуют образованию дефектов типа микротрещин [12]; наличие дефектов способствует ухудшению пластических свойств металла [13].

Полученные данные показывают, что локализация пожара может привести к падению трещиностойкости металла, увеличению дефектов на его поверхности и резкому смещению порога хладноломкости в область положительных температур. Поскольку температурный разброс нагрева металла оборудования при пожаре очень высок, то нельзя однозначно сказать, что материал при небольших скоростях охлаждения имеет большую стойкость к дальнейшему развитию трещины. Однако, следует отметить, что при температурах нагрева материала при пожаре ниже 727°С трещиностойкость стали 20 увеличивается при небольших скоростях охлаждения (1-56°С/мин).

Таким образом, на изменения, происходящие в стали во время пожара, влияет не только сам нагрев открытым пламенем, но и скорость охлаждения, зависящая от способа тушения. Данные факты необходимо учитывать как при разработке мероприятий ликвидации пожаров, так и при оценке технического состояния оборудования.

Исследования выполнялись при поддержке лаборатории «Механика деформирования и разрушения конструкционных материалов» Межвузовского Центра коллективного пользования «Региональный научно-производственный комплекс «Недра»» Уфимского государственного нефтяного техниче-

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляев А.П. *Металловедение*. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1986. 541с.
 2. Черепанов Г.П. *Механика хрупкого разрушения*. М.: Наука, 1974. 640с.
 3. СНиП 21-01-97 *Пожарная безопасность зданий и сооружений*. М.: изд-во стандартов, 1907. 54 с.
 4. Ямщикова С.А. *Повышение огнезащитной способности вспучивающихся покрытий для нефтегазовой отрасли: автореф. дисс. ... канд. техн. наук*. Уфа, 2009. 24 с.
 5. Баратов А.Н., Корольченко А.Я., Кравчук Г.Н. *Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справ. изд.: в 2 кн*. М.: Химия, 1990. 62 с.
 6. *Трещиностойкость и механические свойства конструкционных материалов технических систем* Москвичёв В.В. [и др.]. Новосибирск: Наука, 2002. 334с.
 7. Башкин Ю.А., Ушаков Б.К., Секей А.Г. *Технология термической обработки стали*. М.: Металлургия, 1986. 424 с.
 8. ГОСТ 9454-78 *Методы испытаний на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах*. М.: изд-во стандартов, 1978. 35 с.
 9. ГОСТ 25.506-85 *Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении*. М.: изд-во стандартов, 1985. 69 с.
 10. ГОСТ 1497-84 *Металлы. Методы испытаний на растяжение*. М.: Стандартинформ. М.: изд-во стандартов, 1984. 42 с.
 11. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. *Материаловедение: учебник для вузов*. М.: Машиностроение, 1990. 528 с.
 12. Худяков М.А. *Материаловедение*. Уфа: УГНТУ, 2006. 164 с.
 13. Фетисов Г.П. *Материаловедение и технология металлов*. М.: Высшая школа, 2001. 638 с.
- Наумкин Е.А., канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВПО УГНТУ*
Naumkin E.A., cand.tech.sci., associate professor of chair «Technological machines and equipment», FSBEI USPTU
Кузеев М.И., канд. техн. наук, генеральный директор, ООО «НПЦ «Техпроект»
Kuzeev M.I., cand.tech.sci., general director, LLC «NPC «Techprojekt»
Белозеров В.В., аспирант кафедры «Технологические машины и оборудование» ФГБОУ ВПО УГНТУ
Belozеров V.V., postgraduate student of chair «Technological machines and equipment», FSBEI USPTU
Кудашев Р.Р., аспирант кафедры «Технологические машины и оборудование» ФГБОУ ВПО УГНТУ
Kudashhev R.R., postgraduate student of chair «Technological machines and equipment», FSBEI USPTU
e-mail: ynaumkin@mail.ru