

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-90-106

Слободянский М.Г.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

E-mail: m.slobodianskii@gmail.com

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОТКАЗОВ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПО КРИТЕРИЯМ ПРОЧНОСТИ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ СЕРОГО ЧУГУНА, НА ОСНОВЕ МИКРОСТРУКТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Аннотация. В статье предлагается методика оценки гамма-процентного ресурса деталей металлургического оборудования, изготовленных из серого чугуна, на основе микроструктурного моделирования его напряженного состояния, которая сформулирована с использованием известных зависимостей для оценки среднего ресурса деталей механического оборудования по критерию кинетической прочности, метода линеаризации случайных аргументов позволяющего оценить дисперсию исследуемой функции и инструментов микроструктурного моделирования напряженного состояния материала. Она позволяет на стадиях проектирования и эксплуатации учитывать всестороннее влияние на гамма-процентный ресурс условий нагружения исследуемого технического объекта, его рабочей температуры, физических и механических характеристик структурных составляющих серого чугуна. Её главными отличительными особенностями являются математические зависимости, позволяющие оценивать величину дисперсии параметров необходимых для расчета ресурсных характеристик, а также возможность учета анизотропии реальной структуры серых чугунов. Дополнительно проведена процедура верификации предлагаемой методики сравнением теоретически полученных значений гамма-процентного ресурса с величиной, установленной в нормативно-технической документации. В качестве объекта исследований рассмотрена распорная плита щековой дробилки СМД-110, изготавливаемая из серого чугуна марки СЧ-20, физические и механические характеристики структурных составляющих которого, такие как модуль упругости и микротвердость по Виккерсу, экспериментально оценивались с использованием метода инструментального индентирования. Ошибка прогнозирования не превышает 18 %, что в свою очередь подтверждает достаточный уровень достоверности предлагаемых в настоящей статье теоретических решений, которые могут быть использованы при проектировании деталей металлургического оборудования, изготовленных из серых чугунов, а также при формировании структуры периодичности его ремонтов.

Ключевые слова: гамма-процентный ресурс, долговечность, металлургическое оборудование, напряженное состояние, микроструктурное моделирование, серый чугун.

Введение. Серые чугуны получили широкое применение в металлургическом машиностроении при изготовлении разнообразной номенклатуры промышленных изделий, которая включает в себя: крышки, зубчатые колеса, поршни, корпусные детали редукторов, маховики, муфты сцепления, элементы машин, работающие на сжатие и т.д. Однако особенности их микроструктуры в большинстве случаев определяет и в тоже время сильно ограничивает возможные области использования.

Внеплановые отказы деталей металлургических машин, изготовленных из различных марок серых чугунов, по критериям прочности приводят к существенному повышению затрат на ремонтные мероприятия, направленные на поддержание оборудования в работоспособном состоянии и снижению производительности производства.

На стадиях проектирования и эксплуатации механического оборудования металлургического

производства для оценки работоспособности деталей и узлов, изготовленных из серых чугунов, используются те же общие принципы, как и для других конструкционных материалов, которые не учитывают особенности строения их микроструктуры. В частности, форму графитовых включений, которая определяет прочностные свойства серого чугуна и возможные области его применения [1], однако в инженерной практике при оценке работоспособности изготовленных из него деталей учитывают лишь только макросвойства, такие как предел прочности, твердость и другие. Поэтому актуальным является вопрос разработки комплексного подхода, позволяющего прогнозировать долговечность деталей металлургического оборудования, изготовленных из серых чугунов с учетом особенностей реальной их микроструктуры.

При проектировании и эксплуатации деталей металлургического оборудования для рас-

чета их работоспособности используется статический критерий прочности [2 - 4]. Данный подход предполагает сравнение максимальных расчетных напряжений, возникающих в исследуемом техническом объекте с величиной предельно допускаемых, которые определяются в функции предела прочности или предела текучести материала. Если расчетные напряжения не превышают предельно допускаемые, то подразумевается, что условие работоспособности выполняется, и исследуемая деталь может работать сколь угодно долго. Вывод о работоспособности формируется на основе значений запаса прочности, определяемого отношением предельно допускаемых напряжений к расчетным, минимально допустимая величина которого назначается при проектировании технического объекта согласно рекомендациям работ [2–4]. При использовании статического критерия прочности ресурс детали не прогнозируется.

В случае, если деталь эксплуатируется в условиях стационарного циклического нагружения, то её средний ресурс вычисляется из соотношения количества циклов приложения нагрузки до достижения предельного состояния к частоте нагружения [3–6]. Однако, для использования указанного подхода необходимы данные о параметрах кривой усталости Веллера, что в свою очередь требует проведения длительных и дорогостоящих лабораторных испытаний.

Указанные подходы [2–6] предполагают оценку долговечности деталей с использованием показателей, представляющих собой детерминированные величины, что в свою очередь может быть недостаточно информативным в случае разработки регламента ТОиР металлургического оборудования.

В работах [7, 8] приведена методика расчета вероятности безотказной работы деталей машин по критериям прочности, которая определяется как вероятность выполнения следующего условия:

$$S > 0, \quad (1)$$

где $S = R - \sigma$ – случайная величина; R – предел прочности или текучести материала исследуемой детали; σ – максимальные напряжения в детали, которые в свою очередь тоже принимаются случайной величиной.

Основным допущением подхода, предлагаемого в работах [7, 8], является то, что распределение случайных величин принимается по нормальному закону, и в этом случае вероятность безотказной работы детали рассчитывается с использованием нормированных таблиц по значению квантили.

Используя схожее допущение о распределении ресурса деталей и узлов металлургических

машин по нормальному закону, авторы работ [9, 10] предлагают применение метода линеаризации функции случайных аргументов, согласно [11], для оценки показателей долговечности типовых элементов металлургического оборудования, таких как шестерни и колеса зубчатых передач, подшипников качения, а также валов и осей. Он позволяет выполнять проектную оценку основных показателей долговечности исследуемых объектов, таких как вероятность безотказной работы и гамма-процентный ресурс для следующих условий:

- исследуемые детали металлургического оборудования работают в условиях циклического нагружения;
- случайными величинами принимаются: геометрические размеры детали в диапазонах установленных допусков (согласно конструкторской документации), условия нагружения (кинематические и силовые характеристики), механические характеристики материалов.

Поскольку предлагаемый авторами работ [9, 10] подход базируется на определении среднего ресурса деталей, функционирующих в условиях стационарного циклического нагружения, то для определения его дисперсии с использованием метода линеаризации случайных аргументов [11] необходимо учитывать рассеяние возможных значений исходных данных. Таким образом, фактор случайности при определении величин действующих напряжений и количества циклов приложения нагрузки до достижения предельного состояния учитывается за счет рассеяния значений геометрических размеров детали в диапазонах установленных допусков, которые указываются в конструкторской документации. Стохастический характер механических характеристик материалов определяется возможным диапазоном значений в справочной литературе.

Гамма-процентный ресурс определяется из уравнения квантили нормального распределения для изначально заданного значения вероятности безотказной работы исследуемой детали металлургического оборудования [9, 10].

Данный подход [9, 10], как и описанные выше, также предусматривает необходимость использования кривой усталости материала.

Известен аналитический подход [12–15] к оценке среднего ресурса деталей и узлов металлургического оборудования, в основе которого использованы принципы параметрической надежности машин А.С. Проникова [16] и базовые положения кинетической концепции повреждения и разрушения материалов В.В. Федорова [17, 18]. Он позволяет на стадиях проектирования и эксплуатации рассчитывать средний ресурс исследуемого технического объекта по

различным критериям прочности в функции рабочей температуры, условий внешнего нагружения, механических и теплофизических характеристик материала.

Авторами работы [19] предложен семиэтапный методологический подход построения физико-вероятностных моделей отказов объемно нагруженных деталей машин, в рамках которого параметром, описывающим их состояние, принимается плотность потенциальной составляющей

$$t_\gamma = \frac{\bar{u}_e \cdot \Delta \bar{u}_* - \sqrt{(\Delta \bar{u}_* \cdot \bar{u}_e)^2 - \left([u_{np(\gamma)}]^2 - \sigma_{u_e}^2 - \bar{u}_e^2 \right) \cdot \left([u_{np(\gamma)}]^2 \cdot \sigma_{u_{e0}}^2 - \Delta \bar{u}_*^2 \right)}}{\bar{u}_e^2 - [u_{np(\gamma)}]^2 \cdot \sigma_{u_e}^2}, \quad (2)$$

где \bar{u}_e и σ_{u_e} – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение скорости повреждения структуры материала [19]; $\Delta \bar{u}_* = u_{e*} - \bar{u}_{e0}$ – математическое ожидание предельной величины параметра состояния u_{et} исследуемой детали [19]; $[u_{np(\gamma)}]$ – значение квантили определяемое величиной допустимой вероятности безотказной работы.

В качестве параметров, представляющих собой случайную величину, то есть имеющих исходное рассеяние, принимаются начальное значение плотности внутренней энергии u_{e0} и скорость повреждения структуры материала \dot{u}_e [19]. Авторами работы [19] вводится допущение о распределении их по нормальному закону, согласно [11, 16]. Однако следует учитывать, что в рамках рассматриваемого методологического подхода, [19] определяющего общую концепцию построения физико-вероятностных моделей отказов по кинетическому критерию прочности, для использования зависимости (2) необходимо определение числовых значений дисперсии и среднеквадратического отклонения принятых случайных параметров, что является весьма затруднительным.

Несмотря на достаточно высокий теоретический уровень описания физического процесса повреждения и разрушения материалов по различным критериям прочности и наличия зависимостей, позволяющих оценивать средний ресурс деталей машин [12–15, 19] в функции рабочей температуры, условий внешнего нагружения, механических и теплофизических свойств материала, не предусматривается возможность учёта анизотропии его микроструктуры. При оценке показателей долговечности используется величина макронапряжений, которая может быть определена с использованием как зависимостей теории сопротивления материалов, так и метода

внутренней энергии u_{et} , в соответствии с [12–15, 17, 18]. Рассматриваемый методологический подход предполагает оценку гамма-процентного ресурса исходя из допущения того, что выбранный параметр состояния u_{et} исследуемого технического объекта изменяется по нормальному закону распределения, таким образом, зависимость для его оценки принимает вид [19]:

конечно-элементного расчета напряженно-деформированного состояния в рамках общих принципов механики сплошной среды. В этом случае не учитывается неоднородность реальной микроструктуры материала, а именно процентное соотношение структурных составляющих, их геометрические параметры и механические характеристики, соответственно не представляется возможным оценить их влияние на величину показателей долговечности исследуемой детали.

Анализ известных работ показал, что в основе широко применяемых подходов к оценке долговечности деталей по критериям прочности лежат математические зависимости, требующие экспериментального определения эмпирических коэффициентов, в частности для кривой усталости материала [2–6, 9, 10]. Более того, они не в полной мере соответствуют реальной физической картине процесса разрушения материала и не учитывают особенности реальной микроструктуры, в частности серых чугунов, при оценке показателей долговечности.

Вопрос учета влияния особенностей реальной микроструктуры материала на долговечность нагруженных деталей металлургического оборудования может быть решен с использованием метода микроструктурного моделирования его напряженного состояния [20–24].

Целью исследований в данной работе является разработка методики вероятностной оценки показателей долговечности деталей металлургического оборудования, изготовленных из серого чугуна, на основе микроструктурного моделирования его напряженного состояния.

Материалы и методы. Разработка методики предполагает совместное использование основополагающих принципов:

- параметрической теории надежности А.С. Проникова [16];
- кинетической концепции разрушения материалов В.В. Федорова [17, 18];

- аналитического подхода к оценке среднего ресурса деталей и узлов металлургического оборудования [12 - 15];

- метода линеаризации случайных аргументов [11];

- микромасштабного моделирования напряженного состояния реальной микроструктуры материала.

Верификация разрабатываемой методики предполагается на примере моделирования эксплуатации распорной плиты щековой дробилки СМД-110, изготовленной из СЧ-20.

Экспериментальные исследования подразумевают выполнение:

- исследований микроструктуры образцов из серого чугуна марки СЧ-20 для последующего формирования элементарного репрезентативного объема;

- определение микротвердости и модуля упругости отдельных структурных компонентов исследуемой марки чугуна, значения которых необходимы для оценки напряженного состояния репрезентативного объема и показателей долговечности исследуемого технического объекта с использованием предлагаемой методики.

Моделирование напряженного состояния исследуемого материала на макро- и микроуровнях выполнялось в программном комплексе SIMULIA ABAQUS с использованием решателя Static General.

Основная часть. Методика оценки гамма-процентного ресурса деталей металлургического оборудования, изготовленных из серого чугуна, на основе микроструктурного моделирования напряженного состояния. В основе построения предлагаемой методики использована физическая модель разрушения твердых тел, изложенная в работах [12–15, 17–19], которая предполагает, что повреждаемость материала в ходе нагружения вызвана процессом накопления в деформируемых объемах элементарных дефектов. В этом случае полагается, что разрушение твердого тела происходит тогда, когда в его объемах плотность дефектов и повреждений достигает предельной величины [19].

Совместное использование основных положений физической модели разрушения твердых тел [12–15, 17–19], построенной в соответствии с кинетической концепцией их повреждаемости, метода линеаризации случайных аргументов [11], позволяющего оценить дисперсию исследуемой функции и инструментов микроструктурного моделирования напряженного состояния, позволяет сформулировать методику, предполагающую оценку гамма-процентного ресурса деталей, изготовленных из различных металлических материалов, в частности из серых чугунов.

Базовыми зависимостями для оценки математического ожидания ресурса исследуемого технического объекта в настоящей работе приняты уравнения, опубликованные в работах [12, 15, 19], которые предполагают при наличии определённого комплекса исходных данных выполнение расчёта величины среднего ресурса.

Однако для оценки гамма-процентного ресурса в данном случае необходимы математические зависимости, позволяющие определить не только средний ресурс (математическое ожидание), но и величину его дисперсии.

Для определения величины дисперсии параметров, входящих в методику оценки среднего ресурса технических объектов по критериям прочности [12–15, 17–19], предлагается использование метода линеаризации случайных аргументов [11], который был успешно апробирован в работах [9, 10].

Согласно работам [12–15, 17–19], значение ресурса исследуемой детали, работающей в условиях, приводящих к её отказу по критериям прочности, зависит от следующих параметров, которые в свою очередь могут быть недетерминированными величинами: физические (модуль упругости, коэффициент Пуассона, плотность), механические (предел текучести, твердость по Виккерсу) и теплофизические (удельная теплоемкость, коэффициент линейного теплового расширения, энтальпия плавления в твердом состоянии) характеристики материала. В этом случае ресурс представляет собой функцию случайных аргументов, соответственно является случайной величиной, которая характеризуется дисперсией и математическим ожиданием.

При выводе зависимостей для оценки величин дисперсии и среднеквадратического отклонения на основе применения метода линеаризации случайных аргументов использован подход, представленный в работе [11].

Более того, согласно подходу, изложенному в работах [12–15, 19], средний ресурс нагруженной детали определяется в функции напряжений и характеристик материала на макроуровне, таких как предел текучести, твердость по Виккерсу, модуль упругости и не предполагает учёт фактической неоднородности его микроструктуры.

Главным теоретическим положением предлагаемой методики является расчет ресурсных характеристик материала в заданных условиях нагружения на основе моделирования напряженного состояния его отдельных структурных составляющих, разрушение которых в свою очередь определяет искомые показатели долговечности. Таким образом, ресурс детали из серого

чугуна может быть определен исходя из результатов оценки напряженного состояния его структурных компонентов (перлита, феррита, графита) и значений их физических, а также механических характеристик.

С учетом вышеизложенного, ниже представлены основные зависимости для расчета математического ожидания и дисперсии ресурса, а также определяющих его параметров.

Согласно [12–15, 19], средний ресурс (математическое ожидание ресурса) исследуемой детали по критерию прочности определяется с использованием следующей зависимости:

$$t = (u_{e^*} - u_{e0}) / \dot{u}_{et}, \quad (3)$$

где $u_{e^*} = \Delta H_{ТВ} - c \cdot \rho \cdot T$ – предельное значение плотности внутренней энергии дефектов материала соответственно [12–15, 19];

$$u_{e0} = \left((0,067 \cdot H_{\mu})^{1,2} \cdot k_{\sigma} \right)^2 / (6 \cdot G) - \text{предельное и исходное значение плотности внутренней энергии дефектов материала соответственно [12–15, 19];}$$

где H_{μ} – микротвердость по Виккерсу структурной составляющей исследуемого материала;

$$\bar{\dot{u}}_e = j \cdot k_{cmp} \cdot U(\sigma_0, T_f) - \text{средняя скорость повреждаемости структуры материала [12–15, 19];}$$

где $U(\sigma_0, T_f)$ – высота симметричного энергетического барьера [12–15, 19], которая может быть определена в функции предела текучести и микронапряжений, возникающих в структурной составляющей исследуемой детали.

Уравнение для расчета дисперсии ресурса будет иметь вид:

$$D_t = (\bar{\dot{u}}_e)^{-2} \cdot (D_{u_{e^*}} + D_{u_{e0}} + ((u_{e^*} - u_{e0})^2 \cdot D_{\dot{u}_{et}}) / \bar{\dot{u}}_e^2), \quad (4)$$

где $D_{u_{e^*}}$, $D_{u_{e0}}$, $D_{\dot{u}_{et}}$ – дисперсии параметров, входящих в уравнение (1).

$k_{\sigma} = (6,47 \cdot 10^{-6} \cdot H_{\mu} + 1,2 \cdot 10^{-3})^{-1}$ – комплексный структурный параметр материала детали, определяемый в функции микротвердости его соответствующей структурной составляющей [12–15, 17–19];

G – модуль сдвига материала;

$\Delta H_{ТВ}$ – энтальпия плавления материала исследуемой детали в твердом состоянии [12–15, 17–19];

c и ρ – удельная теплоемкость и плотность материала;

T – рабочая температура исследуемой нагруженной детали.

j – результирующая удельная скорость накопления дефектов материала без учета сопротивления среды по Ле-Шателье [12–15, 19];

k_{cmp} – средний за время деформирования исследуемого объекта коэффициент Ле-Шателье, учитывающий сопротивление структуры материала её повреждаемости [12–15, 19];

$U(\sigma_0, T_f)$ – высота симметричного энергетического барьера [12–15, 19], которая может быть определена в функции предела текучести и микронапряжений, возникающих в структурной составляющей исследуемой детали.

Зависимости для расчета дисперсии параметров u_{e^*} , u_{e0} , $\bar{\dot{u}}_e$, k_{σ} , определяющих величину ресурса детали по уравнению (3), принимают следующий вид:

$$D_{u_{e^*}} = D_{\Delta H_{ТВ}} + T^2 (\rho^2 \cdot D_c + c^2 \cdot D_{\rho}) + (-c \cdot \rho)^2 \cdot D_T, \quad (5)$$

$$D_{u_{e0}} = \left((0,067 \cdot H_{\mu})^{4,8} \cdot k_{\sigma}^4 / (36 \cdot G^2) \right) \cdot (5,747 \cdot HV_{\mu}^{-2} \cdot D_{H_{\mu}} + 4 \cdot k_{\sigma}^{-2} \cdot D_{k_{\sigma}} + D_G / G^2), \quad (6)$$

$$D_{\dot{u}_e} = (k_{cmp} \cdot U(\sigma_0, T_f))^2 \cdot D_j + (j \cdot U(\sigma_0, T_f))^2 \cdot D_{k_{cmp}} + (j \cdot k_{cmp})^2 \cdot D_{U(\sigma_0, T_f)}, \quad (7)$$

$$D_{k_{\sigma}} = \left((-6,47 \cdot 10^{-6}) / (6,47 \cdot 10^{-6} \cdot HV_{\mu} + 1,2 \cdot 10^{-3}) \right)^2 \cdot D_{H_{\mu}}, \quad (8)$$

где $D_{\Delta H_{ТВ}}$, D_c , D_{ρ} , D_T , $D_{HV_{\mu}}$, D_G , D_j , $D_{U(\sigma_0, T_f)}$ – дисперсии параметров, определяющих значение ресурса и указанных в описании уравнения (3).

В данной статье приводятся только базовые уравнения, и излагается принцип определения

дисперсий исследуемой функции и определяющих её аргументов на основе применения метода линеаризации [11].

Зависимости, полученные с использованием метода линеаризации случайных аргументов, согласно [11], для расчета дисперсии предполагают возможность оценки влияния рассеяния каждого

из аргументов на дисперсию исследуемой функции, в нашем случае ресурса. Однако следует учитывать, что чем больше исходных параметров являются случайными, тем больше рассеяние имеет исследуемая функция. Поэтому зависимости для определения дисперсий могут быть упрощены, поскольку значения дисперсий параметров, не имеющих рассеяние будут равны нулю.

Гамма-процентный ресурс может быть определен исходя из допущения, что ресурс будет подчиняться нормальному закону распределения, поскольку его величина зависит от большого числа параметров, которые в свою очередь имеют стохастический характер [11]. В этом случае зависимость для его оценки примет вид:

$$t_\gamma = t - z \cdot \sqrt{D_t}, \quad (9)$$

где z – квантиль нормального распределения.

Параметры u_{e0} и k_σ , согласно [12–15, 17–19], определяются в функции макрохарактеристик. Однако, поскольку основным теоретическим положением предлагаемой методики является определение показателей долговечности детали на основе анализа напряженного состояния микроструктуры материала, то для расчета приведенных выше параметров необходимо использование характеристик определяющих свойства его структурных составляющих, таких как микротвердость HV_μ , модуль упругости E_{IT} и др.

Микротвердость HV_μ , а также модуль упругости E_{IT} структурных составляющих материалов (феррита, перлита, графита и т.д.), в частности для серых чугунов, не являются справочными данными, поэтому для их определения необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований.

Для оценки среднего ресурса, согласно методикам работ [12–15, 19], необходимо определение величины напряжений, возникающих в исследуемой детали на макроуровне, что в свою очередь предполагает представление материала как изотропной среды. Данный подход не учитывает неоднородность реальной микроструктуры материала и влияние её особенностей (диаметр зерен по Ферету, процент их содержания, неоднородность распределения свойств по объему) на показатели долговечности исследуемого технического объекта.

В настоящей работе предлагается применение метода микроструктурного моделирования напряженного состояния материала, который позволяет учитывать его анизотропию. Он заключается в расчете напряженного состояния репрезентативного объема (Representative Volume Element (RVE)), трехмерная модель которого

формируется на основе результатов микроструктурного анализа материала, в ходе которого определяются структурные составляющие, их процентное соотношение, а также геометрические параметры.

В соответствии с работами [20–24], можно сформулировать общую последовательность этапов микроструктурного моделирования напряженного состояния материала:

1. Проведение микроструктурного анализа материала, результатом которого является цифровой фотоснимок с отображением структурных составляющих, а также определение их процентного соотношения.

2. Выполнение графической обработки снимка микроструктуры с целью выделения отдельных структурных фаз и последующей его векторизации.

3. Формирование трехмерной модели репрезентативного объема на основе полученного векторного изображения микроструктуры материала с учетом полного соответствия геометрических размеров каждого структурного компонента RVE, тем, что установлены для реальных образцов.

4. Назначение физических и механических характеристик каждой структурной составляющей, в данном случае для перлита, феррита и графита, таких как модуль упругости, плотность, коэффициент Пуассона, предел текучести.

5. Проведение процедуры моделирования напряженного состояния исследуемого репрезентативного объема с использованием функциональных возможностей субмоделирования (Submodeling) реализованного в программном комплексе SIMULIA ABAQUS. В этом случае, результаты напряженного состояния для глобальной модели (макромодели) исследуемого технического объекта послужат в качестве условий нагружения для элементарного репрезентативного объема.

По результатам моделирования напряженного состояния репрезентативного объема материала исследуемой детали определяются максимальные напряжения, возникающие в соответствующей структурной составляющей, а также места их локализации. На основе полученных данных о напряженном состоянии, с использованием зависимостей (3) – (8), а также экспериментально определённых значений микротвёрдости и модуля упругости структурных составляющих материала, возможно прогнозирование показателей долговечности, таких как вероятность безотказной работы и гамма-процентный ресурс, деталей металлургического оборудования изготовленных из различных марок серых чугунов.

Результаты экспериментальных исследований образцов из серого чугуна марки СЧ-20. Для формирования 3d модели элементарного репрезентативного объема (RVE) серого чугуна марки СЧ-20 были проведены исследования микроструктуры в НИИ «Наносталей» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» с использованием инвертированного микроскопа Zeiss Axio Observer 3, результаты которого отображены на рисунке 1а.

Исследуемый образец представляет собой феррито-перлитную структуру с включениями

пластинчатого графита. На следующем этапе, применяя программный комплекс Thixomet, выполнена бинаризация с выделением соответствующих структурных фаз, однако для более детального отображения всех компонентов структуры СЧ-20 проведена дополнительная обработка в специализированных графических редакторах, в результате чего получен снимок (см. рис. 1б) микроструктуры пригодный для последующей векторизации. Красным цветом выделена перлитная основа (матрица), зеленым – ферритные включения, черным – пластинчатый графит.

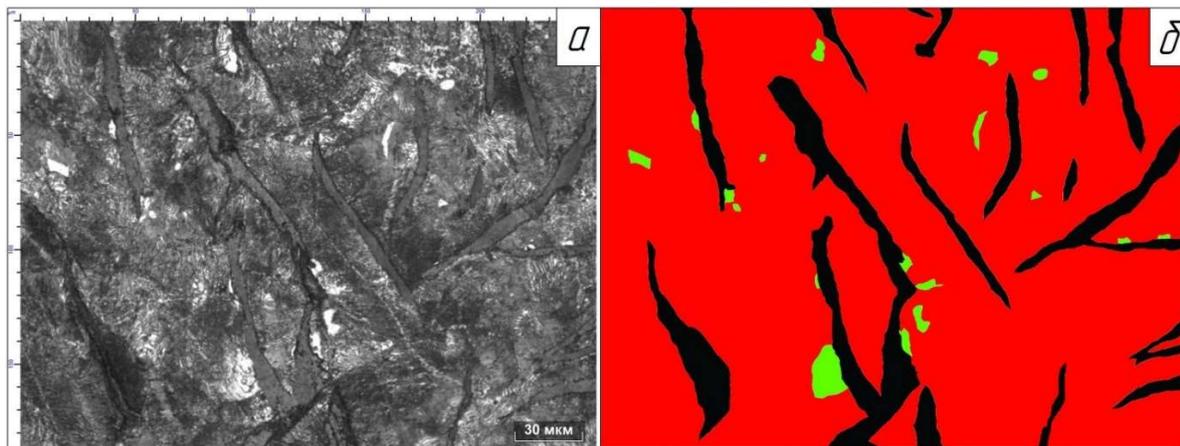


Рис. 1. Результаты исследований микроструктуры образца из серого чугуна СЧ-20 (увеличение 500х):
а) снимок микроструктуры образца из серого чугуна СЧ-20,
б) результаты обработки снимка микроструктуры для последующего формирования RVE

Дополнительно определён химический состав исследуемых образцов на оптическом эмиссионном спектрометре Spectromaxx, который показал следующее содержание основных элементов: С – 3,45 %; Si – 2,05 %; Mn – 0,8 %; P – 0,145 %; S – 0,075%. Полученные результаты соответствуют требованиям, установленным ГОСТ 1412-85.

Для выполнения всесторонних исследований показателей долговечности рассматриваемого технического объекта, с позиции прогнозирования момента разрушения отдельных структурных составляющих его материала, необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований по оценке величины микротвердости. В этом случае наиболее предпочтительным является применение метода инструментального индентирования, который позволяет оценить микротвердость отдельных структурных составляющих исследуемого материала.

Оценку значений микротвердости по Виккерсу производили с использованием динамического микротвердомера Shimadzu DUH-211S в соответствии с ГОСТ Р 8.748-2011 и ISO 14577-1 Annex A.

Согласно ГОСТ Р 8.748-2011, измерение микротвердости производится при непрерывном

внедрении в материал индентора, который представляет собой алмазный наконечник (индентор Берковича) с углом при вершине 115 градусов, под действием плавно нарастающей нагрузки с последующим её снятием. В процессе проведения испытаний происходит непрерывное отслеживание и регистрация зависимости перемещения индентора от прикладываемой нагрузки.

При проведении испытаний были приняты следующие значения параметров нагружения:

- а) максимальная нагрузка индентирования 200 мН при исследовании общего значения микротвердости материала и 25 мН при определении значений для каждой его структурной составляющей;
- б) минимальная нагрузка 1,96 мН;
- в) скорость нагружения 70,067 мН/с;
- г) длительность выдержки при максимальной нагрузке 2 с;
- д) длительность выдержки при минимальной нагрузке 2 с.

Фотографии отпечатков индентора, полученных в ходе проведения испытаний по измерению динамической твердости и модуля упругости структурных составляющих чугуна марки СЧ-20, представлены на рисунке 2.

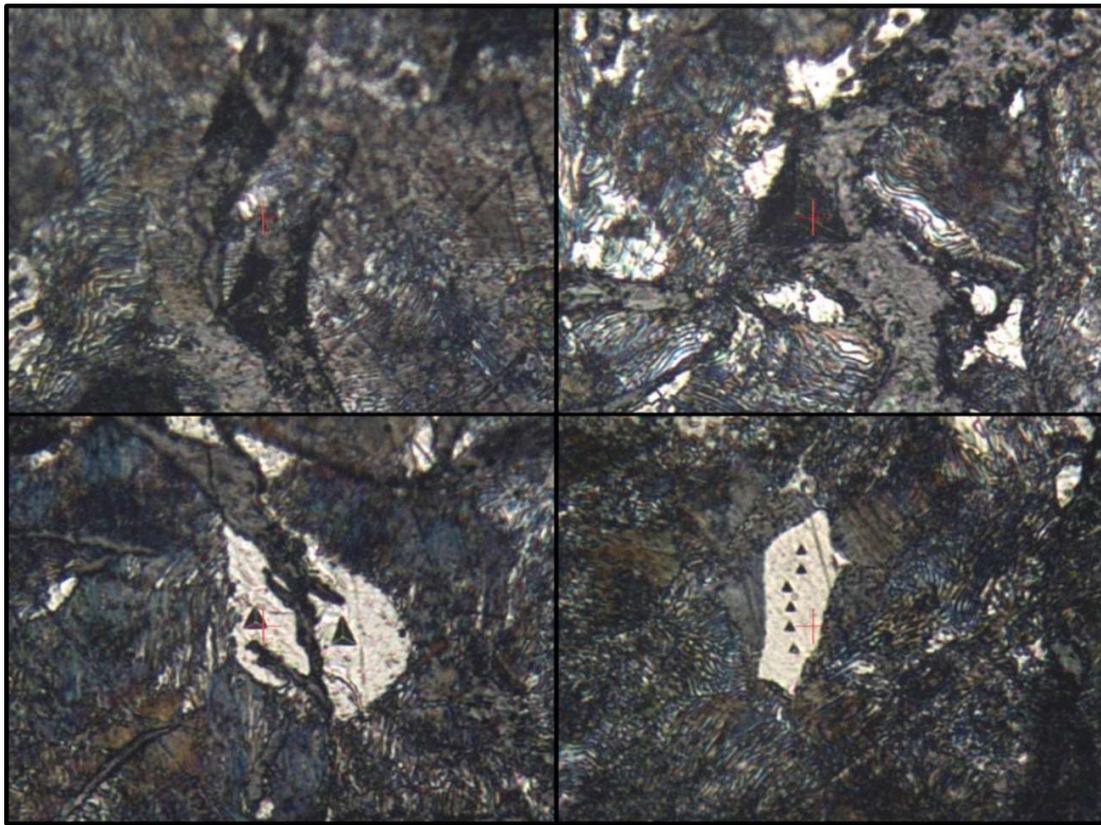


Рис. 2. Фотографии отпечатков индентора при измерении динамической твердости структурных составляющих чугуна СЧ-20

В ходе проведения испытаний определялись:

- твердость по шкале Мартенса HM_s , определяемая по наклону кривой нагружения на F-h-диаграмме;
- твердость индентирования H_{IT} ;
- микротвердость по Виккерсу HV_μ ;

- модуль упругости E_{IT} .

Результаты экспериментальной оценки значений микротвердости и модуля упругости структурных составляющих образцов из серого чугуна марки СЧ-20 при инструментальном индентировании в соответствии с ГОСТ Р 8.748-2011 отображены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты экспериментальной оценки микротвердости и модуля упругости структурных составляющих серого чугуна марки СЧ-20 при инструментальном индентировании по ГОСТ Р 8.748-2011

| Структурная составляющая материала | | Твердость индентирования H_{IT} , МПа | Твердость по шкале Мартенса HM_s , МПа | Микротвердость HV_μ , МПа | Модуль упругости E_{IT} , МПа |
|------------------------------------|--------------|---|--|-------------------------------|---------------------------------|
| Перлит* | Сред. знач. | 12425,038 | 3698,712 | 3137,95 | $4,063 \cdot 10^5$ |
| | Станд. откл. | 2290,349 | 554,07 | 550,885 | $6,76 \cdot 10^4$ |
| | Коэф. вар. | 0,184 | 0,150 | 0,176 | 0,166 |
| Феррит* | Сред. знач. | 9035,778 | 2798,93 | 2299,63 | $4,129 \cdot 10^5$ |
| | Станд. откл. | 1650,643 | 487,998 | 342,246 | $6,805 \cdot 10^4$ |
| | Коэф. вар. | 0,183 | 0,1743 | 0,149 | 0,165 |
| Графит* | Сред. знач. | 658,139 | 747,517 | 198,985 | $6,586 \cdot 10^4$ |
| | Станд. откл. | 113,658 | 130,368 | 33,5751 | $1,241 \cdot 10^4$ |
| | Коэф. вар. | 0,173 | 0,174 | 0,169 | 0,188 |
| Общее значение для материала** | Сред. знач. | 3080,351 | 2182,085 | 2808,227 | $1,115 \cdot 10^5$ |
| | Станд. откл. | 568,65 | 422,96 | 502,684 | $1,7047 \cdot 10^4$ |
| | Коэф. вар. | 0,185 | 0,193 | 0,179 | 0,15 |

Примечание:
 *значения получены при усилии 25 мН;
 **значения получены при усилии 200 мН.

Результаты лабораторных исследований использованы при верификации разработанной методики на примере оценки гамма-процентного ресурса распорной щековой дробилки СМД-110 со сложным движением щеки.

Верификация теоретических решений на примере распорной плиты щековой дробилки. Верификация предлагаемых в настоящей работе решений подразумевает сравнение расчетных значений гамма-процентного ресурса с величиной, установленной нормативно-технической документацией исследуемого объекта. В качестве объекта исследований выбрана распорная плита щековой дробилки СМД-110 со сложным движением щеки, которая широко используется в различных отраслях промышленности и применяется для крупного и среднего дробления горных пород с пределом прочности не более 300 МПа. Распорная плита является неотъемлемой частью конструкции дробилки и выполняет предохранительную функцию, в случае попадания в рабочую камеру не дробимого материала, который может привести к поломке более дорогостоящих комплектующих, таких как дробящих плит или подвижной щеки.

Поскольку распорная плита функционирует в условиях циклического нагружения на сжатие, поэтому в качестве материала для её изготовления применяются серые чугуны, преимущественно марок СЧ-20 и СЧ-25.

В случае, если дробилка функционирует в стационарном режиме, то при условии отсутствия не дробимых объектов в рабочей камере ресурс распорной плиты должен соответствовать требованиям, установленным системой ТОиР данного агрегата, поскольку внеплановые отказы, вызванные её поломкой, могут привести к существенным финансовым затратам, связанным с вынужденными простоями на ремонт. Поэтому обеспечение требуемого уровня долговечности дробилки по критерию циклической прочности распорной плиты является актуальной практической задачей.

Прогнозирование гамма-процентного ресурса распорной плиты щековой дробилки СМД-110 проводилось в 4 этапа.

На первом этапе выполнялась оценка параметров нагружения распорной плиты согласно методикам работ [25, 26] для наиболее сложных условий эксплуатации, которые предполагают дробление куска породы размером 500 мм с пределом прочности на сжатие 285 МПа, с учетом того что его насыпная масса после дробления должна быть 1,8 т/м³. Для заданных условий определена величина сжимающего усилия, действующего на распорную плиту, которое составило 2,913 МН.

На втором этапе проведена оценка напряженного состояния материала распорной плиты как изотропной среды в программном комплексе SIMULIA ABAQUS. Основным вопросом при организации выполнения процедуры моделирования является определение типа и выбор метода наложения сетки конечных элементов. В данной работе рассматривались три варианта генерации конечно-элементной сетки: с использованием функции Adaptive remeshing и построением графика конвергенции; с уточнением размера конечного элемента в предполагаемом месте концентрации напряжений; формирование сетки с постоянным размером по всему объему исследуемого макрообъекта.

Первый вариант предполагает построение адаптивной сетки конечных элементов, уточняя её размер в соответствующих участках исследуемой детали на основе результатов оценки напряженного состояния, полученных в рамках предыдущей расчетной итерации. Данный метод реализуется с использованием функции Adaptive remeshing программного комплекса ABAQUS. Алгоритм выполнения расчетов с использованием функции Adaptive remeshing представляет собой последовательность следующих операций:

1. Выполнение первой расчетной итерации предполагает назначение постоянного размера конечного элемента сетки, для которого производится оценка напряженного состояния исследуемой распорной плиты, и определяются места концентрации максимальных напряжений.

2. Во второй расчетной итерации, по результатам оценки напряженного состояния (НС) предыдущего этапа, производится уточнение размера сетки конечных элементов в местах локализации максимальных напряжений, после чего расчет НС возобновляется. Данная операция повторяется в рамках каждой последующей расчетной итерации.

3. После выполнения всех расчетных итераций, число которых определяет исследователь самостоятельно, выполняется построение графика конвергенции и соответствующая проверка сходимости результатов. Расчет признается выполненным, а его результаты корректными, если разница между значениями напряжений, полученных на текущем и предыдущем шаге вычислений, не превышает установленный предел. Если процент расхождения результатов превышает установленное значение, то моделирование напряженного состояния исследуемого объекта продолжается с уточнением размера конечного элемента сетки в местах концентрации напряжений.

Результаты оценки напряженного состояния распорной плиты для первого варианта генерации сетки конечных элементов представлены на рисунке 3а.

Моделирование напряженного состояния проводилось с использованием решателя Static General. Исходными данными для расчета являлись физические и механические характеристики серого чугуна марки СЧ-20 [27] такие как плотность, модуль упругости, предел текучести, а также параметры нагружения в виде усилия сжатия, действующего на распорную плиту. Генерация сетки осуществлялась десятиузловым тетраэдрическим элементом C3D10M с исходным размером 20 мм, количество которых составило 64945. При использовании функции Adaptive remeshing установлены следующие условия сходимости:

- локальный тип сходимости (конвергенции) размещения конечных элементов сетки;
- число расчетных итераций 15;
- процент расхождения результатов не должен превышать 1 %.

На рисунке 3б представлен график конвергенции, полученный в результате моделирования напряженного состояния распорной плиты с использованием функциональных возможностей Adaptive remeshing. Максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу составили 141,014 МПа и были определены по результатам девятой расчетной итерации. Ошибка расхождения значений напряжений Мизеса на 8-ой и 9-ой расчётных итерациях составила 0,73 %, что в свою очередь удовлетворяет установленному критерию.

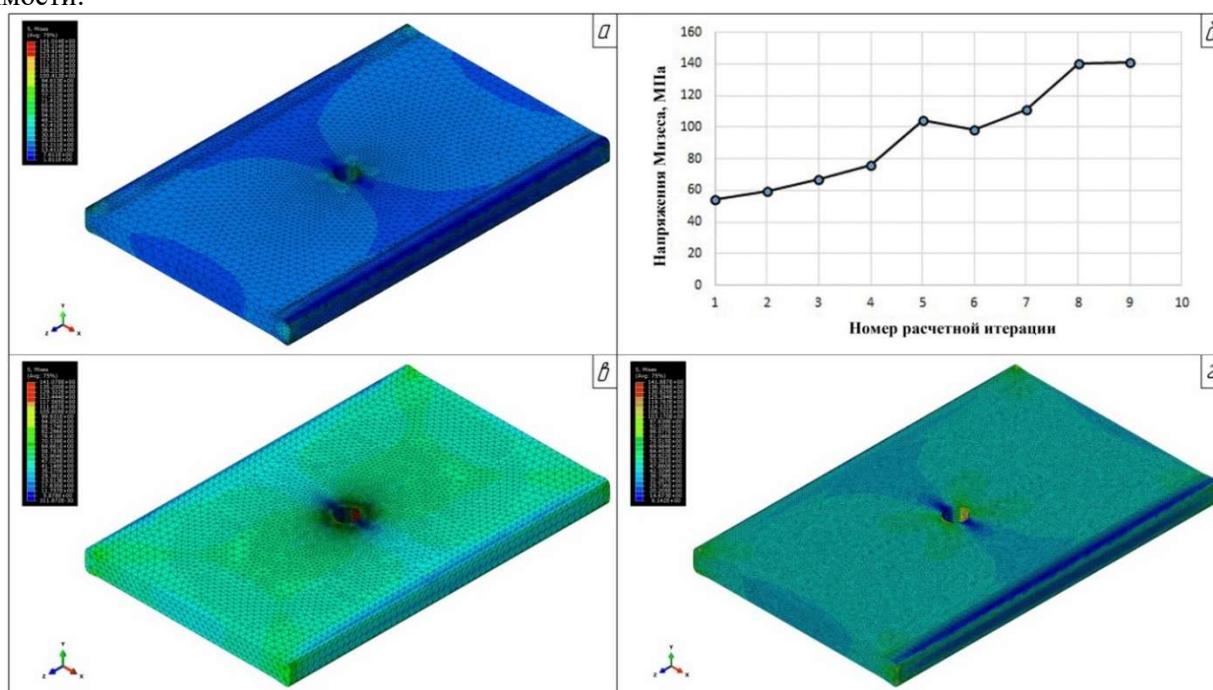


Рис. 3. Результаты оценки напряжений Мизеса макромодели распорной плиты:

- а) построение сетки с использованием Adaptive remeshing, б) график конвергенции (сходимости) при выполнении моделирования с использованием Adaptive remeshing, в) уточнение размеров сетки в предполагаемом месте концентрации напряжений, г) фиксированный размер конечного элемента сетки

В рамках девятой расчетной итерации 3d модель распорной плиты включала в себя 159569 конечных элементов.

В ходе моделирования напряженного состояния установлено, что место концентрации максимальных напряжений возникает в отверстии, расположенном в центральной части распорной плиты, что в свою очередь подтверждается практикой эксплуатации, так как именно в этом месте происходит зарождение усталостной трещины и последующее разрушение.

Второй вариант генерации конечно-элементной сетки предполагал её наложение с фиксированным значением размера по всему объему

трехмерной модели распорной плиты за исключением места, в котором наиболее вероятно появление концентраторов напряжений, в данном случае отверстия в её центральной части. В области отверстия размер конечных элементов не превышал 5 мм, когда как величина в остальном объеме составляла 20 мм.

Графическое представление результатов оценки напряженного состояния распорной плиты с использованием второго способа генерирования сетки конечных элементов отображено на рисунке 3в. Максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу составили 141,078 МПа.

Расхождение результатов между первым и вторым способом оказалось незначительным.

Третий вариант наложения сетки конечных элементов подразумевает её формирование по всему объёму исследуемой трехмерной модели распорной плиты с постоянным значением размера, принятым 5 мм. В этом случае модель распорной плиты включала в себя 932192 элемента. Результаты моделирования напряженного состояния представлены на рисунке 3г. Как и предполагалось, концентрация максимальных напряжений была выявлена в районе центрального отверстия, что в свою очередь подтверждается практикой эксплуатации. Величина максимальных напряжений по Мизесу составила 141,887 МПа.

Следует отметить, что для всех трёх вариантов генерации сетки результаты моделирования

незначительно отличались друг от друга. Однако необходимо учитывать, что для последующей постановки задачи микроструктурного моделирования наиболее предпочтительным будет третий вариант, предполагающий наложение сетки с постоянным размером конечного элемента по всему объёму исследуемого макрообъекта.

На третьем этапе проведена процедура микроструктурного моделирования напряженного состояния серого чугуна марки СЧ-20 с учетом его анизотропии, используемого для изготовления исследуемой распорной плиты. Схема, отражающая принцип организации микроструктурного моделирования НС отображена на рисунке 4.

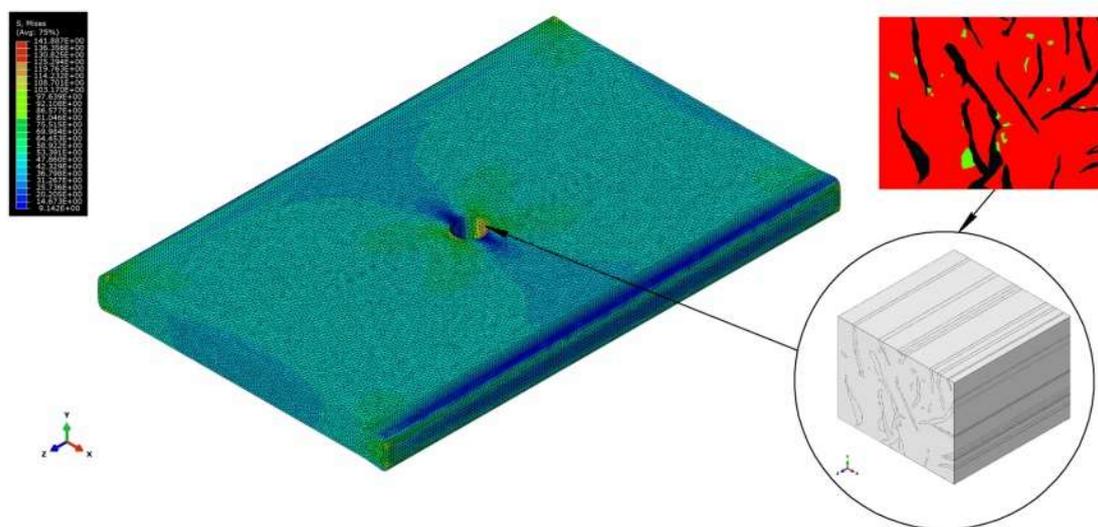


Рис. 4. Принципиальная схема проведения микроструктурного моделирования напряженного состояния СЧ-20 распорной плиты щековой дробилки СМД-110

Микроструктурное моделирование напряженного состояния материала предполагает формирование трехмерной модели элементарного репрезентативного объема (RVE) на основе результатов его структурного анализа, выраженных в виде снимка с выделением отдельных фаз (см. рис. 1б и рис. 4). Неотъемлемым условием является соответствие геометрических размеров каждого структурного компонента RVE, тем, что установлены в результате микроструктурного анализа образцов реального материала.

Трехмерная модель RVE формируется на основе выполнения операции векторизации изображения, отображенного на рисунке 1б, при этом вводится допущение о том, что в любом сечении репрезентативного объема должно сохраняться процентное соотношение структурных компонентов с соблюдением масштабного фактора и его соответствия снимку на рисунке 1а.

После получения модели репрезентативного объема каждой структурной составляющей, в

данном случае перлиту, ферриту и графиту, производится присвоение значений физических и механических характеристик, согласно результатам исследований, опубликованных в работах [28–30]. В качестве исходных параметров, определяющих свойства структурных составляющих RVE, были приняты: модуль упругости, значения которого были определены при инструментальном индентировании по ГОСТ Р 8.748-2011 (см. табл. 1), коэффициент Пуассона, плотность, критические текучести [28–30].

Для выполнения процедуры оценки напряженного состояния сформированного единичного элементарного репрезентативного объема используются функциональные возможности субмоделирования (Submodeling), реализованные в программной среде ABAQUS. Условиями нагружения RVE будут являться результаты расчета напряженного состояния макромоделей распорной плиты щековой дробилки (рис. 3г). Формирование сетки осуществляется десятиузловым

тетраэдрическим элементом С3D10М. Количество конечных элементов в сформированном репрезентативном объеме составляло 334618.

На рисунке 5 представлены результаты оценки главных и эквивалентных напряжений Мизеса репрезентативного объема серого чугуна

марки СЧ-20. С целью более детального анализа полученных результатов, на рисунке 5 представлено сечение репрезентативного объема, в котором отображаются места локализации максимальных напряжений.

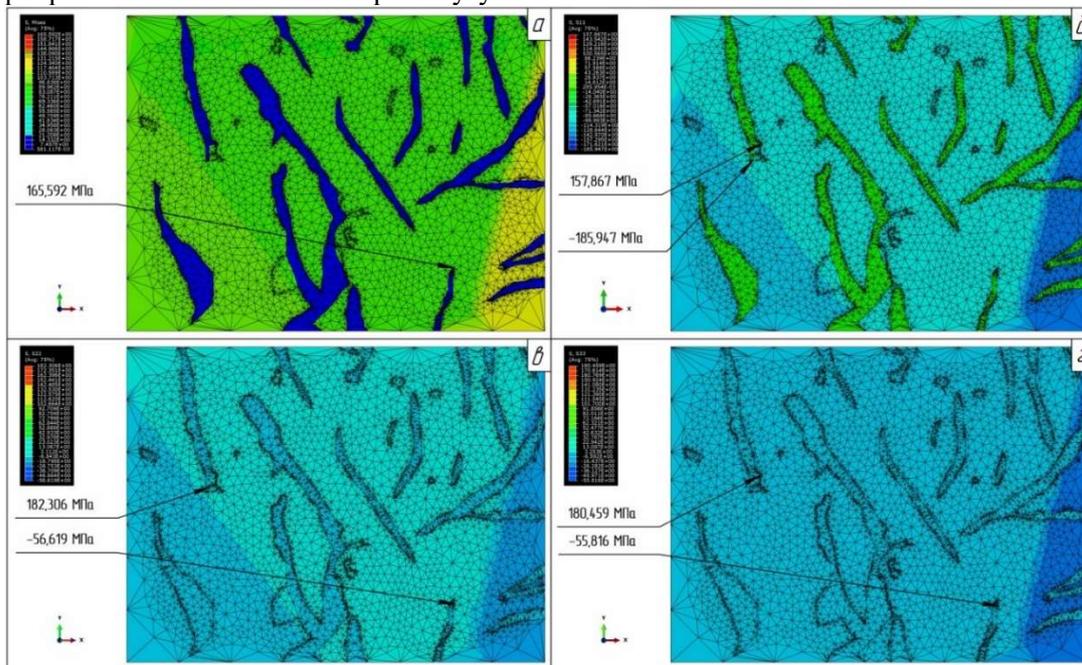


Рис. 5. Результаты оценки напряженного состояния RVE серого чугуна марки СЧ-20:

а) напряжения Мизеса, б) напряжения σ_x (S11), в) напряжения σ_y (S22), г) напряжения σ_z (S33)

Результаты теоретических исследований напряженного состояния репрезентативного объема чугуна марки СЧ-20 представлены в таблице 2, в которой отображены значения главных, эквивалентных и касательных напряжений для каждой структурной составляющей.

Напряжения, обозначенные на рисунке 5 и в таблице 2, имеющие положительное значение – растягивающие, а отрицательные – напряжения сжатия.

Таблица 2

Результаты исследования напряженного состояния репрезентативного объема СЧ-20 распорной плиты дробилки СМД-110

| Напряжения, МПа | Структурная составляющая материала | | | | | |
|---|------------------------------------|----------|---------|----------|--------|---------|
| | Перлит | | Феррит | | Графит | |
| Напряжения Мизеса $\sigma_{экв}$ (S) | 165,592 | | 145,923 | | 14 | |
| σ_x (S11) | Раст. | – | Раст. | 157,867 | Раст. | 25,587 |
| | Сжат. | -185,947 | Сжат. | -148,326 | Сжат. | -66,125 |
| σ_y (S22) | Раст. | 22,375 | Раст. | 182,306 | Раст. | 14,667 |
| | Сжат. | -38,595 | Сжат. | -20,901 | Сжат. | -56,619 |
| σ_z (S33) | Раст. | 13,605 | Раст. | 180,459 | Раст. | 13,368 |
| | Сжат. | -46,414 | Сжат. | -25,999 | Сжат. | -55,816 |
| τ_{xy} (S12) | Раст. | 65,390 | Раст. | 19,310 | Раст. | 8,043 |
| | Сжат. | -60,226 | Сжат. | -23,996 | Сжат. | -8,035 |
| τ_{xz} (S13) | Раст. | 11,685 | Раст. | 113,477 | Раст. | 1,020 |
| | Сжат. | -21,403 | Сжат. | -65,551 | Сжат. | -1,826 |
| τ_{yz} (S23) | Раст. | 5,687 | Раст. | 7,034 | Раст. | 1,159 |
| | Сжат. | -14,219 | Сжат. | -25,278 | Сжат. | -1,440 |
| Примечание. Знак «-» показывает характер (направление действия) напряжений и деформации, в данном случае напряжения сжатия. | | | | | | |

Ввиду особенностей строения серых чугунов и их поведения при действии различных

условий нагружения, принимается, что определяющее значение при оценке работоспособности

деталей будут являться главные напряжения [27]. Более того, анализ напряженного состояния исследуемого репрезентативного объема показал, что для него характерно возникновение, как напряжений сжатия, так и растягивающих напряжений. Однако следует учитывать, что для металлических материалов сжимающие напряжения, согласно [31], не вызывают процесс трещинообразования и не приводят к разрушению.

Согласно работе [32], вследствие действия растягивающих напряжений серые чугуны разрушаются вязко с наличием ямочного излома, которому соответствует транскристаллитное разрушение [33]. Поскольку структура серого чугуна представляет собой металлическую основу с графитовыми включениями, размер и процент содержания которых определяет его механические характеристики, в этом случае следует учитывать, что пластинчатый графит является источником возникновения концентраторов напряжений на границах с зернами перлита и феррита [1, 32]. Ввиду того, что графит в сравнении с перлитом и ферритом обладает значительно более низкими механическими характеристиками, то в определенных случаях его рекомендуется считать пустотами или трещинами в металлической основе [1, 32]. Результаты компьютерного анализа напряжённого состояния исследуемого репрезентативного объема серого чугуна марки СЧ-20, представленные на рисунке 5 и в таблице 2, подтверждают данные утверждения. Во всех случаях концентраторы напряжений, которые в той или иной степени могут быть причиной образования трещин, выявлены на границах с графитовыми включениями.

На следующем этапе исследований проведена процедура верификации предлагаемых теоретических решений, предполагающая сравнение расчетных значений гамма-процентного ресурса с величиной, установленной нормативно-технической документацией исследуемой щековой дробилки.

Согласно требованиям руководства по эксплуатации дробилки СМД-110, средний ремонт, в рамках которого производится замена распорной плиты и сухарей механизма регулирования разгрузочной щели, осуществляется каждые 2400 часов. Таким образом, для обеспечения бесперебойной и стабильной работы дробилки, в случае отсутствия в камере дробления недробимых материалов, ресурс распорной плиты в рассматриваемых условиях эксплуатации должен превышать установленное значение периодичности текущих ремонтов.

На основе результатов моделирования напряженного состояния исследуемого репре-

зентативного объема с использованием предлагаемой методики (3) – (9), а также экспериментально полученных значений микротвердости HV_{μ} и модуля упругости E_{IT} структурных составляющих серого чугуна марки СЧ-20 при инструментальном индентировании по ГОСТ Р 8.748-2011 рассчитаны величины показателей долговечности распорной плиты щековой дробилки СМД-110 для заданных условий эксплуатации: средний ресурс (ресурс с вероятностью безотказной работы 50 %) составил 3314 часов и девяностопроцентный ресурс 2830 часов. Коэффициент вариации не превышает 11 %.

Исходными данными, в качестве случайных величин имеющих рассеяние, приняты микротвердость HV_{μ} и модуль упругости E_{IT} , значения которых определены в ходе экспериментальных исследований и представлены в таблице 1.

Аналитически полученные значения ресурса превышают установленный нормативно-технической документацией, что в свою очередь свидетельствует о работоспособности распорной плиты и подтверждается практикой эксплуатации.

Поскольку щековая дробилка СМД-110, согласно [16], относится к технологическому оборудованию первого класса надежности, полагаем, что величина межремонтного периода, установленного руководством по эксплуатации, соответствует девяностопроцентному ресурсу. В этом случае, ошибка прогнозирования не превышает 18 %.

Учитывая полученные результаты, можно заключить, что предлагаемая методика оценки гамма-процентного ресурса деталей металлургического оборудования, изготовленных из серого чугуна, на основе микроструктурного моделирования напряженного состояния обладает достаточным уровнем достоверности.

Выводы.

1. Разработана методика оценки гамма-процентного ресурса деталей металлургического оборудования, изготовленных из серого чугуна, на основе микроструктурного моделирования напряженного состояния. Она предполагает совместное использование известных зависимостей для оценки среднего ресурса деталей механического оборудования по критерию кинетической прочности, метода линеаризации случайных аргументов, позволяющего оценить дисперсию исследуемой функции и инструментов микроструктурного моделирования напряженного состояния материала. К отличительным особенностям предлагаемой методики, определяющим значимые научные результаты, следует отнести: математические зависимости, позволяющие рассчитать

дисперсии параметров необходимых для оценки ресурсных характеристик исследуемого объекта; возможность учета анизотропии реальной структуры серых чугунов при выполнении процедуры вычисления показателей долговечности нагруженных деталей металлургического оборудования.

2. Проведена процедура верификация предлагаемой методики путем сравнения расчетных значений гамма-процентного ресурса с величиной установленной нормативной документацией исследуемого технического объекта. В качестве объекта исследований рассмотрена распорная плита щековой дробилки СМД-110, изготавливаемая из серого чугуна марки СЧ-20. Ошибка прогнозирования девяностопроцентного ресурса не превышает 18 %.

3. Представленные в настоящей статье решения могут быть использованы на стадиях проектирования и эксплуатации деталей металлургического оборудования, изготовленных из серых чугунов, для выполнения процедуры предиктивной вероятностной оценки показателей их долговечности, а также при формировании структуры периодичности ремонтов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Арзамасов Б.Н., Брострем В.А., Буше Н.А. Конструкционные материалы: Справочник. М. Машиностроение, 1990. 688 с.
2. Иванов М.Н., Финогенов В.А. Детали машин: Учебник для машиностроительных специальностей вузов. М.: Высш. шк., 2008. 408 с.
3. Mechanical Engineers' Handbook, Volume 1: Materials and Engineering Mechanics 4th Edition / Edited by Myer Kutz. 2015. P. 1040
4. Машиностроение. Энциклопедия. Т. IV-1. Детали машин Конструкционная прочность. Трение, износ, смазка. М.: Машиностроение, 1995. 864 с.
5. Гусев А.С., Даниленко К.Б., Стародубцева С.А. Вероятностная оценка появления в элементах конструкций усталостных повреждений // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. №3. С. 3–9. DOI 10.18698/0536-1044-2016-3-3-9
6. Евграфов В.А., Орлов Б.Н. Прогнозирование усталостной долговечности деталей почвообрабатывающих машин с учетом механики разрушения // ТРУДЫ ГОСНИТИ. 2009. Т. 103. С. 103–106
7. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Соппротивление материалов: Учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 2003. 560 с.
8. Ключев В.В., Болотин В.В., Соснин Ф.Р. и др. Надежность машин. Т. IV-3. М.: Машиностроение. 2003. 592 с.
9. Халикова О.Р., Кутлубаев И.М., Макаров А.Н., Усов И.Г. Электронная база данных для организации технического обслуживания и ремонта металлургического оборудования // Ремонт, восстановление и модернизация. 2008. №3. С. 37–41.
10. Панфилова О.Р., Великанов В.С., Усов И.Г., Мацко Е.Ю., Кутлубаев И.М. Расчет ресурса деталей структурно-функциональных элементов горных машин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. № 2. С. 43–51.
11. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 2002. 575 с.
12. Анцупов А.В. (мл.), Анцупов А.В., Анцупов В.П. Аналитический метод проектной оценки ресурса элементов металлургических машин // Известия вузов. Черная металлургия. 2017. Том 60. №1. С. 30–35
13. Анцупов А.В., Анцупов А.В., Слободянский М.Г., Анцупов В.П. Проектная оценка повреждаемости материалов и долговечности образцов при испытании их на разрывной машине // Механическое оборудование металлургических заводов, 2013. Вып. 2. С. 70–76
14. Анцупов В.П., Дворников Л.Т., Громаковский Д.Г., Анцупов А.В. (мл.), Анцупов А.В. Основы физической теории надежности деталей машин по критериям кинетической прочности материалов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1. С. 141–146.
15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2020618192 Российская Федерация. Долговечность деталей машин / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов, В.П. Анцупов, Ю.С. Ляшева, М.Г. Слободянский // Заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». № 2020617272; заявл. 16.07.2020; опубл. 22.07.2020. 1 с.
16. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. М.: Изд-во МГТУ имени Баумана, 2003. 536 с.
17. Федоров В.В. Кинетика повреждаемости и разрушения твердых тел. Ташкент: Изд-во «Фан» УзССР, 1985. 165 с.
18. Федоров В.В. Основы эргодинамики и синергетики деформируемых тел. Основы эргодинамики деформируемых тел. Калининград: Изд-во ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2014. Ч.3. 222 с.
19. Анцупов А.В. (мл.), Анцупов А.В., Анцупов В.П. Теория и практика обеспечения надежности деталей машин по критериям кинетической прочности и износостойкости материалов:

монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. 308 с.

20. Воронин С.В., Бунова Г.З., Юшин В.Д. Компьютерное исследование влияния реальной структуры материалов на характер распространения трещин в хрупких анизотропных телах // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2006. № 4. С. 72–77

21. Huang X., Wang J., Zhao S., Yao Z., Liu C. High-resolution multiscale modeling of mechanical behavior of cold-drawn pearlitic steels // J Mater Res Technol. 2021. Vol. 15. Pp. 5920–5935 DOI.org/10.1016/j.jmrt.2021.10.087

22. Polyakova M., Konstantinov D., Korchunov A., Dabala' M. The Use the Concept of Multiscale Simulation to Improve the Topology of TRIP-Steel Parts Operating Under Extreme Loads. Proceedings of the 8th International Conference on Industrial Engineering // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2023. Pp. 196–206 DOI:10.1007/978-3-031-14125-6_20

23. Etse G., Caggiano A., Vrech S. Multiscale failure analysis of fiber reinforced concrete based on a discrete crack model // Int J Fract. 2012. Vol. 178. Pp. 131–146. DOI:10.1007/s10704-012-9733-z

24. Константинов Д.В., Корчунов А.Г. Мультимасштабное компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. № 1. С. 36–43

25. Шарипов Л.Х. Щековые дробилки. Конструкции и расчеты. Учебное пособие. Воронежский государственный архитектурно-строительный университет. 2016. 84 с.

26. Клушанцев Б.В. Дробилки. Конструкция, расчёт и особенности эксплуатации. М.: Машиностроение, 1990. 320 с.

27. Шерман А.Д., Жуков А.А. Чугун: справочник. М.: Металлургия, 1991. 575с.

28. Tomota Y., Umamoto M., Komatsubara, N. Prediction of mechanical properties of multi-phase steels based on stress-strain curves // ISIJ International. 1992. №32(3). Pp. 343–349.

29. Basantia S.K., Bhattacharya A, Khutia N, Das D. Plastic behavior of ferrite–pearlite, ferrite–bainite and ferrite–martensite steels: experiments and micromechanical modelling // Metal Mater Int. 2021. №27. Pp. 1025–1043.

30. Balzani D., Schroder J. Some basic ideas for the reconstruction of statistically similar microstructures for multiscale simulations // Proc. Appl. Math. Mech. 2008. №8. Pp. 10533–10534.

31. Жарский И.М. Материаловедение: учебное пособие. Минск: Высшая школа, 2015. 557 с.

32. Гуляев А.П. Материаловедение. М.: Металлургия, 1986. 544 с.

33. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. М.: Машиностроение, 1990. 528 с.

Информация об авторах

Слободянский Михаил Геннадьевич, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и эксплуатация металлургических машин и оборудования». E-mail: m.slobodianskii@gmail.com. Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. Россия, 455000, Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38.

Поступила 15.02.2024 г.

© Слободянский М.Г., 2024

Slobodianskii M.G.

Nosov Magnitogorsk State Technical University

E-mail: m.slobodianskii@gmail.com

FAILURE PREDICTION OF METALLURGICAL EQUIPMENT PARTS BY STRENGTH CRITERIA, MADE OF GREY CAST IRON, ON THE BASIS OF MICROSTRUCTURAL MODELLING OF STRESS STATE

Abstract. *The article proposes a methodology for estimating the gamma-percent life of metallurgical equipment parts made of grey cast iron on the basis of micro structural modelling of its stress state, which is formulated using known relationships for estimating the average life of mechanical equipment parts by the criterion of kinetic strength, the linearisation method of random arguments allowing to estimate the variance of the function under study and tools of micro structural modelling of the stress state of the material. It allows at the stages of design and operation to take into account the all-round influence of loading conditions of the investigated technical object, its operating temperature, physical and mechanical characteristics of structural components of grey cast iron on gamma-percent resource. Its main distinctive features are mathematical dependences allowing estimating the value of dispersion of parameters necessary for calculation of resource characteristics, as well as the possibility of taking into account the anisotropy of the real structure of grey cast*

iron. In addition, the procedure of verification of the proposed methodology by comparing theoretically obtained values of gamma-percent resource with the value established in the normative and technical documentation is carried out. The spacer plate of SMD-110 jaw crusher, made of grey cast iron of GI-20 grade, is considered as an object of research physical and mechanical characteristics of its structural components, such as modulus of elasticity and Vickers micro hardness were experimentally evaluated using the method of instrumental indentation. The prediction error does not exceed 18%, which in turn confirms a sufficient level of reliability of the theoretical solutions proposed in this article, which can be used in the design of metallurgical equipment parts made of grey cast iron, as well as in the formation of the periodicity structure of its repairs.

Keywords: gamma-percentage resource, durability, metallurgical equipment, stress state, microstructural modeling, gray cast iron.

REFERENCES

1. Arzamasov B.N., Brostrom V.A., Bush N.A. et al. Structural materials: Directory [Konstrukcionnye materialy: Spravochnik] M. Mechanical Engineering, 1990. 688 p. (rus)
2. Ivanov M.N., Finogenov V.A. Machine parts: Textbook for mechanical engineering specialties at universities [Detali mashin: Uchebnik dlya mashinostroitel'nyh special'nostej vuzov]. M.: Higher school, 2008. 408 p. (rus)
3. Mechanical Engineers' Handbook, Volume 1: Materials and Engineering Mechanics 4th Edition / Edited by Myer Kutz. 2015. P. 1040
4. Mechanical engineering. Encyclopedia. Vol. IV-1. Machine parts Structural strength. Friction, wear, lubrication [Mashinostroenie. Enciklopediya. T. IV-1. Detali mashin Konstrukcionnaya prochnost'. Trenie, iznos, smazka]. M.: Mechanical Engineering, 1995. 864 p. (rus)
5. Gusev A.S., Danilenko C.B., Starodubtseva S.A. Probabilistic Estimation of Fatigue Damage in Structural Elements [Veroyatnostnaya ocenka poyavleniya v elementah konstrukcij ustalostnyh povrezhdenij]. BMSTU Journal of Mechanical Engineering. 2016. No. 3. Pp. 3–9. DOI: 10.18698/0536-1044-2016-3-3-9
6. Evgrafov V.A., Orlov B.N. Forecasting the fatigue life of parts of soil-cultivating machines taking into account the mechanics of destruction [Prognozirovanie ustalostnoj dolgovechnosti detalej pochvoobrabatyvayushchih mashin s uchetom mekhaniki razrusheniya]. PROCEEDINGS OF GOSNITI. 2009. Vol. 103. Pp. 103–106 (rus)
7. Aleksandrov A.V., Potapov V.D., Derzhavin B.P. Strength of materials: Textbook for universities [Soprotivlenie materialov: Ucheb. dlya vuzov]. M.: Higher school, 2003. 560 p. (rus)
8. Klyuev V.V., Bolotin V.V., Sosnin F.R. et al. Machine reliability. Vol. IV-3. [Nadezhnost' mashin. T. IV-3] M.: Mechanical Engineering. 2003. 592 p. (rus)
9. Khalikova O. R., Kutlubaev I. M., Makarov A. N., Usov I. G. Electronic database for organizing maintenance and repair of metallurgical equipment [Elektronnaya baza dannyh dlya organizacii tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta metallurgicheskogo oborudovaniya]. Repair, Reconditioning, Modernization. 2008. No. 3. Pp. 37–41. (rus)
10. Panfilova O. R., Velikanov V. S., Usov I. G., Matsko E. Yu., Kutlubaev I. M. Calculation of the service life of structural and functional elements parts of mining machines [Raschet resursa detalej strukturno-funkcional'nyh elementov gornyh mashin]. Fizikotekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh. 2018. No. 2. Pp. 43–51. (rus)
11. Ventzel E.S. Probability theory: textbook for universities [Teoriya veroyatnostej: ucheb. dlya vuzov]. M.: Higher school, 2002. 575 p. (rus)
12. Antsupov A.V. (Jr.), Antsupov A.V., Antsupov V.P. Analytical method for design assessment of the service life of metallurgical machines elements. Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya. 2017. Vol. 60. No. 1. Pp. 30–35. (rus)
13. Antsupov A.V. (Jr.), Antsupov A.V., Slobodianskii M.G., Antsupov V.P. Design assessment of the damageability of materials and durability of samples when tested on a tensile testing machine [Proektnaya ocenka povrezhdaemosti materialov i dolgovechnosti obrazcov pri ispytanii ih na razryvnoj mashine]. Mechanical equipment of metallurgical plants, 2013. Issue. 2. Pp. 70–76 (rus)
14. Antsupov V.P., Dvornikov L.T., Gromakovskiy D. G., Antsupov A.V. (Jr.), Antsupov A.V. Fundamentals of the physical theory of reliability of machine parts according to the criteria of kinetic strength of materials [Osnovy fizicheskoy teorii nadezhnosti detalej mashin po kriteriyam kineticheskoy prochnosti materialov]. Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University. 2014. No. 1. Pp. 141–146. (rus)
15. Antsupov A.V., Antsupov A.V., Antsupov V.P., Lyasheva Yu.S., Slobodyansky M.G. Certificate of state registration of a computer program 2020618192 RF. Applied: 16.07.2020. Published: 22.07.2020. (rus)
16. Pronikov A. S. Parametric reliability of machines [Parametricheskaya nadezhnost' mashin]. Moscow: Izdatelstvo MGTU im. N.E. Bauman, 2003. 536 p. (rus)
17. Fedorov V.V. Kinetics of damage and destruction of solids [Kinetika povrezhdaemosti i razrusheniya tverdyh tel]. Tashkent: Izdatelstvo "Fan" UzSSR, 1985. 165 p. (rus)

18. Fedorov V.V. Fundamentals of ergodynamics and synergetics of deformable bodies. Fundamentals of ergodynamics of deformable bodies. Part 3 [Osnovy ergodinamiki i sinergetiki deformiruemykh tel. Osnovy ergodinamiki deformiruemykh tel]. Kaliningrad: Izdatelstvo FGBOU VPO "KGTU", 2014. 222 p. (rus)
19. Antsupov A.V. (Jr.), Antsupov A.V., Antsupov V.P. Theory and Practice of Assurance of Machine Element Reliability according to Criteria of Material Kinetic Strength and Wear Resistance: monograph [Teoriya i praktika obespecheniya nadezhnosti detalej mashin po kriteriyam kineticheskoy prochnosti i iznosostojkosti materialov: monografiya]. Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., Magnitogorsk. 2015. 308 p. (rus)
20. Voronin S.V., Bunova G.Z., Yushin V.D. A computer-aided study of how a real structure of materials influences a character of crack propagation in brittle anisotropic bodies [Komp'yuternoe issledovanie vliyaniya real'noj struktury materialov na karakter rasprostraneniya treshchin v hrupkih anizotropnykh telah]. Problems of mechanical engineering and automation [Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii]. 2006. No. 4. Pp. 72–77. (rus)
21. Huang X, Wang J, Zhao S, Yao Z, Liu C. High-resolution multiscale modeling of mechanical behavior of cold-drawn pearlitic steels. J Mater Res Technol. 2021. Vol. 15. Pp. 5920–5935 DOI.org/10.1016/j.jmrt.2021.10.087
22. Polyakova M., Konstantinov D., Korchunov A., Dabala' M. The Use the Concept of Multiscale Simulation to Improve the Topology of TRIP-Steel Parts Operating Under Extreme Loads. Proceedings of the 8th International Conference on Industrial Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2023. Pp. 196–206 DOI:10.1007/978-3-031-14125-6_20
23. Etse G., Caggiano A., Vrech S. Multiscale failure analysis of fiber reinforced concrete based on a discrete crack model. Int J Fract. 2012. Vol. 178. Pp. 131–146. DOI:10.1007/s10704-012-9733-z
24. Konstantinov D.V., Korchunov A.G. Multi-scale computer modeling of plastic metal working processes [Mul'timasshtabnoe komp'yuternoe modelirovanie processov obrabotki metallov davleniem]. Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University. 2015. Pp. 36–43. (rus)
25. Sharipov L.Kh. Jaw crushers. Designs and calculations. Tutorial [Shchekovye drobilki. Konstrukcii i raschety. Uchebnoe posobie]. Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. 2016. 84 p. (rus)
26. Klushantsev B.V. Crushers. Design, calculation and operating features [Droibilki. Konstrukciya, raschyot i osobennosti ekspluatacii]. M.: Mechanical Engineering, 1990. 320 p. (rus)
27. Sherman A.D., Zhukov A.A. Cast iron: reference book [CHugun: spravochnik]. M.: Metallurgy, 1991. 575 p. (rus)
28. Tomota Y., Umemoto M., Komatsubara, N. Prediction of mechanical properties of multi-phase steels based on stress-strain curves. ISIJ International. 1992. No.32. Vol. 3. Pp. 343–349.
29. Basantia S.K., Bhattacharya A, Khutia N, Das D. Plastic behavior of ferrite–pearlite, ferrite–bainite and ferrite–martensite steels: experiments and micromechanical modelling. Metal Mater Int. 2021. No.27 Pp.1025-1043.
30. Balzani D., Schroder J. Some basic ideas for the reconstruction of statistically similar microstructures for multiscale simulations. Proc. Appl. Math. Mech. 2008. No.8. Pp. 10533–10534.
31. Zharsky I.M. Materials science: textbook [Materialovedenie: uchebnoe posobie]. Minsk: Higher School, 2015. 557 p. (rus)
32. Gulyaev A.P. Materials Science [Materialovedenie]. M.: Metallurgy, 1986. 544 p. (rus)
33. Lakhtin Yu.M., Leontyeva V.P. Materials Science [Materialovedenie]. M.: Mechanical Engineering, 1990. 528 p. (rus)

Information about the authors

Slobodianskii, Mikhail G. PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Design and Operation of Metallurgical Machines and Equipment. E-mail: m.slobodianskii@gmail.com. Nosov Magnitogorsk State Technical University. Russian Federation, 455000, Magnitogorsk city, Lenin Street, 38.

Received 15.02.2024

Для цитирования:

Слободянский М.Г. Прогнозирование отказов деталей металлургического оборудования по критериям прочности, изготовленных из серого чугуна, на основе микроструктурного моделирования напряженного состояния // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №3. С. 90–106. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-90-106

For citation:

Slobodianskii M.G. Failure prediction of metallurgical equipment parts by strength criteria, made of grey cast iron, on the basis of microstructural modelling of stress state. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 3. Pp. 90–106. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-90-106