ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ
ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ
ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХINNOVATION IN METALLURGICAL INDUSTRIAL
AND LABORATORY EQUIPMENT, TECHNOLOGIES
AND MATERIALS

Оригинальная статья

УДК 669.013:658.58

DOI 10.17073/0368-0797-2021-12-895-902

СНИЖЕНИЕ ВНЕПЛАНОВЫХ ПРОСТОЕВ ОБОРУДОВАНИЯ
ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РЕМОНТОВ И МОДЕРНИЗАЦИИ
НА ОСНОВЕ ПРОЧНОСТНОГО АНАЛИЗАН. А. Чиченев¹, С. М. Горбатюк^{1,2}, Т. Ю. Горовая², А. Н. Фортунатов²¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)² Выксунский филиал НИТУ «МИСиС» (Россия, 607060, Нижегородская область, Выксунский район, р. п. Шиморское, ул. Калинина, 206)

Аннотация. С целью выявления узких мест в работе основного технологического оборудования и накопления данных для разработки организационных и технических мероприятий по снижению внеплановых простоев оборудования на АО «Выксунский металлургический завод» ведется их учет. Все простои фиксируются производственным персоналом в системе автоматизированного анализа работы цеха. Специалистами по надежности в цехах классифицированы все агрегаты по категориям критичности, представленные в виде матрицы, включающей в себя две группы показателей. Первая группа – тяжесть последствий: безопасность персонала, безопасность оборудования и окружающей среды, производственные потери, затраты на устранение неполадок. Вторая – вероятность возникновения: высокая, средняя, низкая и очень низкая. При определении оценки критичности единицы оборудования рассматриваются самый критичный случай поломки и самый худший вариант. Классификация оборудования по категориям критичности используется для его ранжирования с точки зрения надежности. Рассмотрены критерии работоспособности деталей машин, а также основные существующие на сегодняшний день программные комплексы для проведения прочностного анализа. Выбраны два, которые будут использоваться в качестве инструментов прочностного анализа. Проведен анализ внеплановых простоев оборудования по причине разрушения деталей на примере колесопрокатного цеха АО «Выксунский металлургический завод», выгруженных из системы автоматического анализа работы цеха. Предложены направления применения выбранных инструментов прочностного анализа, а также проведен прочностной анализ деталей оборудования с целью повышения их конструкционной надежности. Выполнена оценка потенциального экономического эффекта от внедрения инструментов прочностного анализа, который показал целесообразность применения данного инновационного подхода, приводящего к сокращению простоев.

Ключевые слова: металлургическое производство, внеплановые простои оборудования, причины отказов оборудования, критичность отказа, анализ прочности

Благодарности: В статье использованы материалы выпускной квалификационной работы студента гр. ММТО-17-ВФ НИТУ «МИСиС» Беспалова С.И.

Для цитирования: Чиченев Н.А., Горбатюк С.М., Горовая Т.Ю., Фортунатов А.Н. Снижение внеплановых простоев оборудования при проведении ремонтов и модернизации на основе прочностного анализа // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 12. С. 895–902. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-12-895-902>

Original article

REDUCTION OF EQUIPMENT UNPLANNED DOWNTIME
DURING REPAIRS AND MODERNIZATION BASED
ON STRENGTH ANALYSISN. A. Chichenev¹, S. M. Gorbatyuk^{1,2}, T. Yu. Gorovaya², A. N. Fortunatov²¹ National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS) (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)² Vyksa Branch of the National University of Science and Technology “MISIS” (206 Kalinina Str., Shimorskoe, Vyksa District, Nizhny Novgorod Region 607060, Russian Federation)

Abstract. In order to identify bottlenecks in the equipment operation and accumulate data for the development of organizational and technical measures to reduce unplanned equipment downtime, JSC “Vyksa Metallurgical Plant” keeps records of downtime of the main technological equipment. All equipment downtime is recorded by production personnel in the automated analysis system of the workshop. Reliability specialists in the workshops have classified all units into criticality categories, which are presented in the form of a matrix that includes two groups of indicators: 1) severity of the consequences – personnel safety, safety of equipment and environment, production losses, troubleshooting costs; 2) probability of occurrence – high,

medium, low, or very low. When determining the criticality assessment of an equipment unit, the most critical case of equipment failure and the worst one are considered. Classification of equipment by criticality categories is used to rank equipment in terms of reliability. The article considers the criteria for operability of machine parts, as well as the main software complexes for strength analysis that exist today. Two have been selected that will be used as strength analysis tools. The analysis of equipment unplanned downtime due to the destruction of parts was carried out on the example of the wheel rolling shop of JSC "Vyksa Metallurgical Plant", unloaded from the shop automatic analysis system. The authors proposed the directions of application of the selected strength analysis tools and made the strength analysis of equipment parts in order to increase their structural reliability. An assessment of the potential economic effect of introduction of strength analysis tools showed the feasibility of using this innovative approach leading to downtime reduction.

Keywords: metallurgical production, unplanned downtime, failure cause, failure criticality, strength analysis

Acknowledgements: The article considers materials of the final qualifying work of the student S.I. Bespalov.

For citation: Chicheney N.A., Gorbatyuk S.M., Gorovaya T.Yu., Fortunatov A.N. Reduction of equipment unplanned downtime during repairs and modernization based on strength analysis. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 12, pp. 895–902. (In Russ.).

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-12-895-902>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время надежность технологических машин и оборудования становится одной из основных инженерных проблем и приобретает все более важное значение для металлургического производства [1 – 4]. Недостаточная надежность технологических машин и входящих в них элементов и устройств не только приводит к значительным простоям оборудования, но и существенно увеличивает стоимость их эксплуатации. Повышение требований к качеству технологических машин и оборудования в целях снижения материальных, трудовых и финансовых затрат на техническое обслуживание и ремонт приводит к необходимости модернизации и реконструкции оборудования [5 – 9]. При этом большое внимание уделяется агрегатам по производству листового и профильного проката [10 – 16].

В настоящее время на АО «Выксунский металлургический завод» (ВМЗ) в инженерно-технологическом центре (ИТЦ) отделом по математическому моделированию проводятся расчеты по определению запаса статической прочности и оценки усталостной прочности с использованием системы конечно-элементного анализа ANSYS [17 – 24]. Целью работы является анализ и выявление причин выхода из строя основного технологического оборудования вследствие механического разрушения основных рабочих деталей, узлов и элементов конструкции.

В составе дирекции по ремонтам (ДнР) АО «ВМЗ» есть отдел по проектированию технической документации, который в своей работе использует систему автоматизированного проектирования КОМПАС-3D [25 – 31]. Для сокращения длительности разработки технической документации, а также для выполнения прочностных экспресс-расчетов деталей оборудования в случае необходимости проведения анализа с целью усиления конструкции приобретена сетевая версия системы прочностного анализа APM FEM для КОМПАС-3D.

Основной причиной выбора APM FEM стало то, что в настоящее время на АО «ВМЗ» в качестве системы автоматизированного проектирования уже используется КОМПАС-3D, а APM FEM является дополнительным

модулем для него. Таким образом, нет необходимости в приобретении другой отдельной системы проведения прочностного анализа, что значительно сокращает финансовые затраты. Так же, в случае возникновения необходимости анализа прочности сложных деталей и сборок подготовленная расчетная задача в APM FEM КОМПАС-3D может быть автоматически передана в ANSYS, с которым уже работает отдел по математическому моделированию ИТЦ.

В настоящей работе рассмотрены вопросы снижения внеплановых простоев оборудования и повышения его конструкционной надежности за счет проведения прочностного анализа деталей оборудования с помощью одного из указанных выше инструментов.

ОПИСАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

С целью выявления узких мест в работе основного технологического оборудования и накопления данных для разработки организационных и технических мероприятий по снижению внеплановых простоев оборудования на АО «ВМЗ» ведется их учет [32]. Все простои фиксируются производственным персоналом в системе автоматизированного анализа работы цеха (СААРЦ). Например, анализ простоев оборудования участка стана колесопрокатного цеха (КПЦ) АО «ВМЗ» с 1 января 2018 г. по 31 октября 2019 г. показал, что суммарное время простоев по механической части составило около 140 ч. При этом примерно 36 ч оборудование участка стана простояло по причине разрушения деталей, связанной с недостаточной конструкционной надежностью.

Поскольку участок стана является узким местом КПЦ, то его внеплановые простои ведут напрямую к снижению объема производимой продукции всего цеха. Экономические потери АО «ВМЗ» от указанных простоев составили около 45 млн руб.

Специалистами по надежности в цехах классифицированы все агрегаты по категориям критичности, которые представлены в таблицах, имеющих следующие колонки: «Цех», «Участок», «Агрегат», «Затраты на устранение», «Производственные потери», «Безопас-

ность оборудования и окружающей среды», «Безопасность персонала», «Вероятность возникновения» и «Оценка критичности, балл». Таблица настроена на автоматический подсчет баллов. Оценка критичности данного оборудования определяется в столбце «Оценка критичности, балл» автоматически, после заполнения всех полей, описанных выше.

Категория критичности определяется на основании матрицы критичности (рис. 1), которая включает в себя две группы показателей:

- тяжесть последствий – безопасность персонала, безопасность оборудования и окружающей среды, производственные потери, затраты на устранение неполадок;

- вероятность возникновения – высокая, средняя, низкая, очень низкая. При определении оценки критичности единицы оборудования (агрегата) рассматривается самый критичный случай поломки оборудования и самый худший вариант.

После проведения количественной оценки критичности самого неблагоприятного вида отказа на каждой единице оборудования все оборудование условно разбивается по категориям критичности исходя из полученной оценки критичности: *A* – 32 балла; *B* – 16 баллов; *C* – 4 ÷ 8 баллов; *D* – 2 балла. Существует также

категория критичности *A+*, к ней относится наиболее критичное оборудование цеха, для чего определяются три единицы оборудования с наибольшей длительностью внеплановых простоев за последние шесть месяцев по диаграмме Парето [33 – 39].

Классификация оборудования по категориям критичности используется для его ранжирования с точки зрения надежности.

Исследование видов, последствий и критичности отказов проводят с целью анализа и доработки конструкции технического объекта, производственного процесса, правил эксплуатации, системы технического обслуживания и ремонта технического объекта для предупреждения возникновения и (или) ослабления тяжести возможных последствий его отказов и для достижения требуемых характеристик безопасности, экологичности, эффективности и надежности.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

С целью снижения внеплановых простоев оборудования и повышения его конструкционной надежности предлагается производить прочностной анализ деталей оборудования с помощью одного из инструментов – ANSYS или APM FEM КОМПАС-3D.

Параметр		Приоритет			
Вероятность возникновения	Высокая	8	16	32	64
	Средняя	4	8	16	32
	Низкая	2	4	8	16
	Очень низкая	1	2	4	8
Тяжесть последствий	Безопасность персонала	Микротравма	Легкая травма	Тяжелая травма	Смертельная травма
	Безопасность оборудования и окружающей среды	Экспертиза – «проведение не требуется»; предписание – «предписаний нет»; экология – «воздействия нет, ПДК не превышены»	Экспертиза – «эксплуатация допускается с нормальными параметрами, но требуется периодическое проведение экспертизы»; предписание – «категория В»; экология – «приближение к граничным параметрам ПДК, есть вероятность возникновения выбросов»	Экспертиза – «эксплуатация с ограниченными параметрами»; предписание – «категория Б»; экология – «разовые превышения ПДК, разовые выбросы, увеличение количества отходов»	Экспертиза – «эксплуатация не допустима»; предписание – «категория А»; экология – «значительное превышение ПДК, опасность для человека»
	Производственные потери	Отказ без потерь производства	Снижение объемов выпуска продукции цехом	Остановка технологической цепочки цеха	Остановка технологической цепочки завода
	Затраты на устранение	Менее 1 % годового бюджета участка	От 1 до 5 % годового бюджета участка	От 5 % годового бюджета участка до 5 % годового бюджета цеха	Более 5 % годового бюджета цеха

Рис. 1. Матрица критичности

Fig. 1. Criticality matrix

Матрица применения инструментов прочностного анализа деталей в случае их разрушения

Matrix of application of tools for parts strength analysis in case of their destruction

Категория критичности оборудования	Разрушение / действие	Инструмент	Специалисты, выполняющие анализ	Выводы / мероприятия
<i>A+</i>	Первичное разрушение / проведение прочностного анализа разрушившейся детали	ANSYS	Отдел по математическому моделированию ИТЦ	Заключение / усиление конструкции, замена материала
<i>A</i>	Первичное разрушение / проведение прочностного анализа разрушившейся детали	ANSYS / APM FEM КОМПАС-3D	Отдел по математическому моделированию ИТЦ / отдел по проектированию технической документации ДпР	Заклучение / усиление конструкции, замена материала
<i>B</i>	Первичное разрушение / проведение прочностного анализа разрушившейся детали	APM FEM КОМПАС-3D	Отдел по проектированию технической документации ДпР	Заклучение / усиление конструкции, замена материала
<i>C, D</i>	Повторное разрушение / проведение прочностного анализа разрушившейся детали на усмотрение специалистов службы надежности	APM FEM КОМПАС-3D	Отдел по проектированию технической документации ДпР	Заклучение / усиление конструкции, замена материала

При отказе оборудования по причине разрушения детали необходимо выполнять прочностной анализ ее конструкционной надежности. Исходя из уровня критичности оборудования, на котором произошел отказ, а также из технических возможностей APM FEM КОМПАС-3D и ANSYS разработана матрица применения данных инструментов прочностного анализа деталей в случае их разрушения, которая представлена в таблице.

При выходе из строя оборудования категории критичности *A+* по причине разрушения детали, которое произошло впервые, необходимо всегда производить прочностной анализ конструкционной надежности данной детали. Поскольку оборудование этой категории имеет повышенную критичность исходя из длительности внеплановых простоев за последние шесть месяцев, то для прочностного анализа требуется инструмент с расширенными возможностями и специалисты, которые специализируются на проведении подобных расчетов. Поэтому в этом случае привлекается отдел по математическому моделированию ИТЦ и прочностной анализ производится в ANSYS. По результатам анализа делается заключение о надежности существующей конструкции, при необходимости выдаются рекомендации по усилению конструкции или замене существующего материала детали на материал с более высокими прочностными характеристиками.

При выходе из строя оборудования категории критичности *A* по причине разрушения детали, которое также произошло впервые, производится прочностной анализ конструкции этой детали. Поскольку оборудование этой категории тоже имеет повышенную критичность исходя из частоты возникновения простоев и тя-

жести последствий для производства, то прочностной анализ также должен производиться отделом по математическому моделированию ИТЦ в ANSYS, но может быть произведен и в APM FEM КОМПАС-3D в зависимости от сложности расчета. Решение принимает начальник отдела по проектированию технической документации ДпР. По результатам анализа делается заключение о надежности существующей конструкции, при необходимости выдаются рекомендации по усилению конструкции или замене существующего материала детали на материал с более высокими прочностными характеристиками.

В случае выхода из строя оборудования категории критичности *B* по причине разрушения детали, которое с данной деталью произошло впервые, должен производиться ее прочностной анализ. Поскольку оборудование этой категории имеет меньшую критичность по сравнению с оборудованием категорий *A* и *A+*, то анализ проводится отделом по проектированию технической документации с применением инструмента APM FEM КОМПАС-3D. По результатам анализа делается заключение о надежности существующей конструкции, а в случае необходимости и возможности разрабатывается чертеж с изменениями в конструкции и заменой существующего материала детали на материал с более высокими прочностными характеристиками.

При выходе из строя оборудования категорий критичности *C* и *D* по причине повторного разрушения одной и той же детали, на усмотрение специалистов службы надежности проводится прочностной анализ данной детали отделом по проектированию технической документации ДпР с применением инструмента APM FEM КОМПАС-3D. По результатам анализа делается

заклучение о надежности существующей конструкции. В случае необходимости и возможности, а также исходя из экономической целесообразности по согласованию со специалистами службы надежности разрабатывается чертеж с изменениями в конструкции и заменой существующего материала детали на материал с более высокими прочностными характеристиками.

Целью расследования отказа оборудования по причине разрушения детали является определение коренной причины разрушения – причины, которая изначально привела к нежелательным явлениям, а в случае своего решения могла бы предотвратить это явление. Основные задачи расследования:

- выявление и незамедлительное устранение причин внеплановых простоев с целью предотвращения повторения подобных простоев в будущем;
- выявление и исправление недостатков в системе управления надежностью оборудования.

Принципы расследования внеплановых простоев:

- все внеплановые простои, независимо от продолжительности, должны регистрироваться;
- своевременность и оперативность расследования;
- полнота, последовательность и объективность расследования;
- разработка предложений по улучшению системы управления надежностью оборудования.

На основании разработанной матрицы применения инструментов прочностного анализа деталей в случае их разрушения предлагается схема расследования отказа оборудования по причине разрушения детали, представленная на рис. 2.

При выходе из строя оборудования по причине разрушения детали, согласно матрице применения ин-

струментов прочностного анализа деталей (см. таблицу) в случае их разрушения, проводится прочностной анализ рассматриваемой детали. Если в результате него выявляется недостаточная конструкционная надежность детали, то в случае технической возможности проводится усиление конструкции, а также замена существующего материала детали на материал с более высокими прочностными характеристиками. Если в результате прочностного анализа гипотеза о недостаточной конструкционной надежности не подтверждается, то рассматриваются другие системные причины, такие как неправильная эксплуатация и неправильное обслуживание. После определения корневой причины делаются соответствующие выводы, разрабатываются мероприятия для предотвращения повторения подобных случаев.

В качестве примера рассмотрим прочностной анализ шпилек крепления крышки сервомотора привода клапана наполнения прессового оборудования КПЦ АО «ВМЗ». По данным СААРЦ, суммарное время простоев прессового оборудования участка стана по вине сервомоторов за указанный период составило 3,6 ч. Простои прессового оборудования возникали по причине течи из-под задней крышки сервомотора привода клапана наполнения вследствие разрушения шпилек крепления крышки. Существующая стратегия технического обслуживания сервомотора – замена по фактическому состоянию. Для проверки прочности существующих шпилек М30 крепления задней крышки сервомотора был проведен их прочностной анализ в программном комплексе КОМПАС-3D с модулем АРМ FEM при эксплуатационной нагрузке – давлении на одну шпильку 16 МПа. Для повышения надежности работы сервомотора было принято решение заменить шпильки крепления задней крышки М30 на М36. Кроме того, изменили стратегию обслуживания сервомоторов – с замены по фактическому состоянию на замену 1 раз в 6 месяцев. Расчеты показали, что с учетом потери производительности участка стана за счет простоев и исключения затрат на приобретение новых сервомоторов, потенциальный экономический эффект от исключения внеплановых простоев КПЦ АО «ВМЗ» по причине выхода из строя сервомотора клапана наполнения составил около 4 млн руб.

Выводы

Предложена схема расследования отказа оборудования по причине разрушения детали, а также основные существующие на сегодняшний день программные комплексы для проведения прочностного анализа. Выбраны два программных комплекса ANSYS и КОМПАС-3D, которые будут использоваться в качестве инструментов прочностного анализа. Проведен анализ внеплановых простоев оборудования по причине разрушения деталей на примере колесопрокатного цеха АО «ВМЗ».

Рис. 2. Схема расследования отказа оборудования по причине разрушения детали

Fig. 2. Research scheme of equipment failure due to the part destruction

Предложены направления применения выбранных инструментов прочностного анализа, а также проведен прочностной анализ деталей оборудования с целью по-

вышения их конструкционной надежности. Выполнена оценка потенциального экономического эффекта от внедрения инструментов прочностного анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Майрхофер А., Хартль Ф., Рорхофер А., Штоль К. Мониторинг состояния оборудования при производстве стали // Черные металлы. 2018. № 9. С. 28–33.
2. Gorbatyuk S.M., Pashkov A.N., Morozova I.G., Chicheneva O.N. Technologies for applying Ni-Au coatings to heat sinks of SiC-Al metal matrix composite material // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 38. Part 4. P. 1889–1893. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.581>
3. Савельев А.Н., Северьянов С.С. Оценка работоспособности агрегатов технологической линии «Машина непрерывного литья заготовок» // Известия вузов. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 12. С. 972–978. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-12-972-978>
4. Еронько С.П., Данилов В.Л., Куклев А.В., Ткачев М.Ю., Тиняков В.В., Мечик С.В. Опыт проектирования и промышленного применения систем механизированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы слабовых МНЛЗ // Металлург. 2020. № 3. С. 51–57.
5. Роберов И.Г., Кохан Л.С., Морозов Ю.А., Борисов А.В. Технологический режим тиснения прокаткой рельефных поверхностей // Известия вузов. Черная металлургия. 2009. № 1. С. 27–30.
6. Жарекен А.Ж., Джумалиев А.С. Реконструкция контура охлаждения обжиговой печи // Горный журнал. 2018. № 5. С. 34–35.
7. Калинин Ю.Н., Каменев А.А., Митькин А.В., Киреевков А.Н. Реконструкция обжиговых машин фабрики окомкования // Горный журнал. 2017. № 5. С. 67–69. <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.05.15>
8. Горбатюк С.М., Морозова И.Г., Наумова М.Г. Разработка рабочей модели процесса реиндустриализации производства термической обработки штамповых сталей // Известия вузов. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 5. С. 410–415. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-5-410-415>
9. Горбатюк С.М., Зарапин А.Ю., Чиченев Н.А. Модернизация вибрационного грохота горнорудного общества «Катока» (Ангола) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 1. С. 143–149. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-1-0-143-149>
10. Нефедов А.В., Свичкар В.В., Чиченева О.Н. Реинжиниринг скипового подъемника для загрузки печи литейного отделения ЗАО «РИФАР» // Сталь. 2020. № 7. С. 50–53.
11. Коряк А.В., Чиченев Н.А. Реинжиниринг ходовой тележки с контейнером дуговой сталеплавильной печи // Сталь. 2020. № 1. С. 36–39.
12. Чиченев Н.А. Реинжиниринг устройства для центрирования слэба в клети обжимного стана // Металлург. 2018. № 7. С. 76–80.
13. Ефремов Д.Б., Степанов В.М., Чиченева О.Н. Модернизация механизма быстрого отжима валков прокатной клети ДУО стана 2800 АО «Уральская Сталь» // Сталь. 2020. № 8. С. 44–47.
14. Masini R., Lainati A. Latest bar mill technology // Millenium Steel. 2005. P. 216–227.
15. Thome R., Harste K. Principles of billet soft-reduction and consequences for continuous casting // ISIJ International. 2006. Vol. 46. No. 12. P. 1839–1844. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.46.1839>
16. Rumyantsev M.I. Some approaches to improve the resource efficiency of production of flat rolled steel // CIS Iron and Steel Review. 2016. Vol. 12. P. 32–36. <https://doi.org/10.17580/cisirs.2016.02.07>
17. Бруйка В.А., Фокин В.Г., Солдусова Е.А., Глазунова Н.А., Адеянов И.Е. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: Учебное пособие. Самара: Самарский государственный технический университет, 2010. 271 с.
1. Mayrhofer A., Hartl F., Rohrhofer A., Stohl K. New condition monitoring applications in steelmaking. *Stahl und Eisen*. 2017, vol. 137, no. 11, pp. 147–156. (In Germ.).
2. Gorbatyuk S.M., Pashkov A.N., Morozova I.G., Chicheneva O.N. Technologies for applying Ni-Au coatings to heat sinks of SiC-Al metal matrix composite material. *Materials Today: Proceedings*. 2021, vol. 38, pp. 1889–1893. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.581>
3. Savel'ev A.N., Sever'yanov S.S. Assessment of units' performance of CCM technological line. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 12. pp. 972–978. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-12-972-978>
4. Eron'ko S.P., Danilov V.L., Kuklev A.V., Tkachev M.Yu., Tinyakov V.V., Mechik S.V. Experience of design and industrial application of systems for the driven feed of slag-forming mixtures into the crystallizers of slab CCM. *Metallurgist*. 2020, vol. 64, no. 3–4, pp. 214–222. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-00986-x>
5. Roberov I.G., Kokhan L.S., Morozov Yu.A., Borisov A.V. Relief stamping with grooveless rolling practice. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2009, no. 1, pp. 27–30. (In Russ.).
6. Zhareken A.Zh., Dzhumaliev A.S. Burning furnace cooling circuit refitting. *Gornyi zhurnal*. 2018, no. 5, pp. 34–35. (In Russ.).
7. Kalinenko Yu.N., Kamenev A.A., Mit'kin A.V., Kireenkov A.N. Reengineering of roasting machines at pelletizing factory. *Gornyi zhurnal*. 2017, no. 5, pp. 67–69. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.05.15>
8. Gorbatyuk S.M., Morozova I.G., Naumova M.G. Development of the working model of production reindustrialization of die steel heat treatment. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 5, pp. 410–415. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-5-410-415>
9. Gorbatyuk S.M., Zarapin A.Yu., Chichenev N.A. Reengineering of spiral classifier of Catoca mining company ltd, Angola. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018, vol. 2018, no. 2, pp. 215–221. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-2-0-215-221>
10. Nefedov A.V., Svichkar V.V., Chicheneva O.N. Re-engineering of equipment to feed the melting furnace with aluminum charge. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)*. Radionov A.A., Gasiyarov V.R. eds. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, 2021, pp. 1198–1204. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_139
11. Koryak A.V., Chichenev N.A. Re-engineering of a running trolley with container in EAF. *Stal'*. 2020, no. 1, pp. 36–39. (In Russ.).
12. Chichenev N.A. Re-engineering of the slab-centering unit of a roughing mill stand. *Metallurgist*. 2018, vol. 62, no. 7–8, pp. 701–706. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0711-1>
13. Efremov D.B., Stepanov V.M., Chicheneva O.N. Modernization of the mechanism for rapid pressing of rolls of the rolling stand of the DUO mill 2800 of Ural Steel JSC. *Stal'*. 2020, no. 8, pp. 44–47. (In Russ.).
14. Masini R., Lainati A. Latest bar mill technology. *Millenium Steel*. 2005. P. 216–227.
15. Thome R., Harste K. Principles of billet soft-reduction and consequences for continuous casting. *ISIJ International*. 2006, vol. 46, no. 12, pp. 1839–1844. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.46.1839>
16. Rumyantsev M.I. Some approaches to improve the resource efficiency of production of flat rolled steel. *CIS Iron and Steel Review*. 2016, vol. 12, pp. 32–36. <https://doi.org/10.17580/cisirs.2016.02.07>
17. Bruyaka V.A., Fokin V.G., Soldusova E.A., Glazunova N.A., Adeyanov I.E. *Engineering Analysis in ANSYS Workbench: Manual*. Samara: SSTU, 2010, 271 p. (In Russ.).

18. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. Москва: Едиториал УРСС, 2003. 272 с.
19. Жидков А.В. Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования. Нижний Новгород: НГУ им. Н.И. Лобачевского, 2006. 115 с.
20. АРМ FEM. Система прочностного анализа для КОМПАС-3D. Версия для КОМПАС-3D V16. Руководство пользователя. Королёв: НТЦ «АИМ», 2015. 28 с.
21. Снитко С.А., Яковченко А.В., Горбатюк С.М. Метод учета остаточных технологических напряжений при моделировании напряженно-деформированного состояния диска железнодорожного колеса. Сообщение 1 // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 5. С. 337–344.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-337-344>
22. Ганин Н.Б. Проектирование и прочностной расчет в системе КОМПАС-3D V13: Учебное пособие. М.: ДМК Пресс, 2011. 320 с.
23. Еронько С.П., Данилов В.Л., Ткачев М.Ю., Тиняков В.В., Понамарева Е.А. Модернизация и модельные исследования манипулятора для замены защитной огнеупорной трубы при непрерывной разливке стали // Металлург. 2020. № 4. С. 30–35.
24. Kudashov D.V., Martin U., Heilmaier M., Oettel H. Creep behaviour of ultrafine-grained oxide dispersion strengthened copper prepared by cryomilling // Materials Science and Engineering: A. Vol. 387–389. P. 639–642. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.01.118>
25. Gruner W., Kudashov D.V., Martin U. Determination of oxygen species in mechanically alloyed oxide dispersion strengthened copper // Powder Metallurgy. Vol. 45. No. 4. P. 301–306.
<https://doi.org/10.1179/003258902225007104>
26. Kudashov D.V., Aksenov A.A., Klemm V., Martin U., Oettel H., Portnoy V.K., Zolotarevskii V.S. Microstructure formations in copper-silicon carbide composites during mechanical alloying in a planetary activator // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. 2000. Vol. 31. No. 12. P. 1048–1055. [http://doi.org/10.1002/1521-4052\(200012\)31:12<1048::AID-MAWE1048>3.0.CO;2-D](http://doi.org/10.1002/1521-4052(200012)31:12<1048::AID-MAWE1048>3.0.CO;2-D)
27. Самусев С.В., Люскин А.В., Романцов А.И., Жигунов К.Л., Fortunatov A.N. Исследование очага деформации на прессе шаговой формовки в условиях Челябинского трубопрокатного завода // Известия вузов. Черная металлургия. 2014. Т. 57. № 3. С. 49–52. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-3-49-52>
28. Самусев С.В., Люскин А.В., Романцов А.И., Жигунов К.Л., Fortunatov A.N. Разработка методики расчета параметров инструмента для унификации групп сварных труб на участке кромкогибочных прессов // Известия вузов. Черная металлургия. 2013. № 3. С. 20–22.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2013-3-20-22>
29. El-Sayed T.A., Algash Y.A. Flexural behavior of ultra-high performance geopolymer RC beams reinforced with GFRP bars // Case Studies in Construction Materials. 2021. Vol. 15. Article e00604. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00604>
30. Alshoaibi A.M. Computational simulation of 3D fatigue crack growth under mixed-mode loading // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. No. 13. Article 5953. <https://doi.org/10.3390/app11135953>
31. Papukhiev A., Yang Z. Application of the coupled code ATHLET-ANSYS CFX for the simulation of the flow mixing inside the ROCOM test facility // Progress in Nuclear Energy. 2021. Vol. 137. Article 103785. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103785>
32. Инструкция И.20-440.8. Порядок проведения анализа видов, последствий и критичности отказов. Выкса: АО «ВМЗ», 2019. 16 с.
33. Васильев В.А., Каландаришвили Ш.Н., Новиков В.А., Одинокоев С.А. Управление качеством и сертификация: Учебное пособие. Москва: Интернет Инжиниринг, 2002. 413 с.
34. Гродзенский С.Я. Управление качеством: Учебник. Москва: Проспект, 2017. 222 с.
35. Чагина А.В., Большаков В.П. 3D-моделирование в КОМПАС-3D версий v17 и выше: Учебное пособие. Санкт-Петербург: Питер, 2021. 256 с.
18. Kaplun A.B., Morozov E.M., Olfer'eva M.A. ANSYS in Hands of Engineer: Practical guide. Moscow: Editorial URSS, 2003, 272 p. (In Russ.).
19. Zhidkov A.V. Application of ANSYS System to Solving Problems of Geometric and Finite Element Modeling. Nizhny Novgorod: NSU im. N.I. Lobachevskogo, 2006, 115 p. (In Russ.).
20. APM FEM. Strength Analysis System for COMPASS-3D. Version for COMPASS-3D V16 User Manual. Korolev: NTTs "APM", 2015, 28 p. (In Russ.).
21. Snitko S.A., Yakovchenko A.V., Gorbatyuk S.M. Accounting method for residual technological stresses in modeling the stress-deformed state of a railway wheel disk. Report 1. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 5, pp. 337–344. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-337-344>
22. Ganin N.B. Design and Strength Calculation in COMPASS-3D V13 System: Manual. Moscow: DMK Press, 2011, 320 p. (In Russ.).
23. Eron'ko S.P., Danilov V.L., Tkachev M.Yu., Tinyakov V.V., Ponomareva E.A. Model studies and modernization of a manipulator for tapping spout replacement in continuous steel casting. *Metallurgist*. 2020, vol. 64, no. 3–4, pp. 301–308.
<https://doi.org/10.1007/s11015-020-00996-9>
24. Kudashov D.V., Martin U., Heilmaier M., Oettel H. Creep behaviour of ultrafine-grained oxide dispersion strengthened copper prepared by cryomilling. *Materials Science and Engineering: A*. 2004, vol. 387–389, pp. 639–642. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.01.118>
25. Gruner W., Kudashov D.V., Martin U. Determination of oxygen species in mechanically alloyed oxide dispersion strengthened copper. *Powder Metallurgy*. 2002, vol. 45, no. 4, pp. 301–306.
<https://doi.org/10.1179/003258902225007104>
26. Kudashov D.V., Aksenov A.A., Klemm V., Martin U., Oettel H., Portnoy V.K., Zolotarevskii V.S. Microstructure formations in copper-silicon carbide composites during mechanical alloying in a planetary activator. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. 2020, vol. 31, no. 12, pp. 1048–1055. [http://doi.org/10.1002/1521-4052\(200012\)31:12<1048::AID-MAWE1048>3.0.CO;2-D](http://doi.org/10.1002/1521-4052(200012)31:12<1048::AID-MAWE1048>3.0.CO;2-D)
27. Samusev S.V., Lyuskin A.V., Romantsov A.I., Zhigunov K.L., Fortunatov A.N. Research of the deformation zone on stepwise molding press in conditions of JSC "Cherepovets Pipe-Rolling Plant". *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, vol. 57, no. 3, pp. 49–52. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-3-49-52>
28. Samusev S.V., Lyuskin A.V., Romantsov A.I., Zhigunov K.L., Fortunatov A.N. Calculating tool parameters for standardized welded-pipe groups in edge-bending presses. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, vol. 56, no. 5, pp. 20–22. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2013-3-20-22>
29. El-Sayed T.A., Algash Y.A. Flexural behavior of ultra-high performance geopolymer RC beams reinforced with GFRP bars. *Case Studies in Construction Materials*. 2021, vol. 15, article e00604. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00604>
30. Alshoaibi A.M. Computational simulation of 3D fatigue crack growth under mixed-mode loading. *Applied Sciences*. 2021, vol. 11, no. 13, article 5953. <https://doi.org/10.3390/app11135953>
31. Papukhiev A., Yang Z. Application of the coupled code ATHLET-ANSYS CFX for the simulation of the flow mixing inside the ROCOM test facility. *Progress in Nuclear Energy*. 2021, vol. 137, article 103785. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103785>
32. Инструкция И.20-440.8. Procedure for Analyzing Types, Consequences and Criticality of Failures. Vyksa: VMZ, 2019, 16 p. (In Russ.).
33. Vasil'ev V.A., Kalandarishvili Sh.N., Novikov V.A., Odinokov S.A. Quality Management and Certification: Manual. Moscow: Internet Inzhiniring, 2002, 413 p. (In Russ.).
34. Grodzenskii S.Ya. Quality Management: Textbook. Moscow: Prospekt, 2017, 222 p. (In Russ.).
35. Chagina A.V., Bol'shakov V.P. 3D Modeling in COMPASS-3D of Versions v17 and Higher. Manual. St. Petersburg: Piter, 2021, 256 p. (In Russ.).

36. Bilalov R.A., Smetannikov O.Yu. Numerical investigation of fluid dynamics phenomena in external gear pump // *Computational Continuum Mechanics*. 2021. Vol. 13. No. 4. P. 471–480. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2020.13.4.37>
37. Muszyński Z., Rybak J. Evaluation of terrestrial laser scanner accuracy in the control of hydrotechnical structures // *Studia Geotechnica et Mechanica*. 2017. Vol. 39. No. 4. P. 45–57. <https://doi.org/10.1515/sgem-2017-0036>
38. Rybak J., Baca M., Zyrek T. Practical aspects of tubular pile axial capacity testing // *Int. Multidisc. Sci. GeoConference “Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM”*. 2015. Vol. 2. No. 1. P. 549–554.
39. Anghel C., Gupta K., Jen T.C. Analysis and optimization of surface quality of stainless steel miniature gears manufactured by CO₂ laser cutting // *Optik*. 2020. Vol. 203. Article 164049. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.164049>
36. Bilalov R.A., Smetannikov O.Yu. Numerical investigation of fluid dynamics phenomena in external gear pump. *Computational Continuum Mechanics*. 2021, vol. 13, no. 4, pp. 471–480. (In Russ.). <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2020.13.4.37>
37. Muszyński Z., Rybak J. Evaluation of terrestrial laser scanner accuracy in the control of hydrotechnical structures. *Studia Geotechnica et Mechanica*. 2017, vol. 39, no. 4, pp. 45–57. <https://doi.org/10.1515/sgem-2017-0036>
38. Rybak J., Baca M., Zyrek T. Practical aspects of tubular pile axial capacity testing. *Int. Multidisc. Sci. GeoConference “Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM”*. 2015, vol. 2, no. 1, pp. 549–554.
39. Anghel C., Gupta K., Jen T.C. Analysis and optimization of surface quality of stainless steel miniature gears manufactured by CO₂ laser cutting. *Optik*. 2020, vol. 203, article 164049. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.164049>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Николай Алексеевич Чиченев, д.т.н., профессор кафедры «Инжиниринг технологического оборудования», Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ORCID: 0000-0002-9019-4675

E-mail: chich38@mail.ru

Сергей Михайлович Горбатюк, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Инжиниринг технологического оборудования», Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Выксунский филиал НИТУ «МИСиС»

ORCID: 0000-0002-4368-5965

E-mail: sgor02@mail.ru

Татьяна Юрьевна Горвая, заместитель директора, Выксунский филиал НИТУ «МИСиС»

E-mail: gorovat@mail.ru

Александр Николаевич Фортунатов, доцент кафедры технологии и оборудования обработки металлов давлением, Выксунский филиал НИТУ «МИСиС»

E-mail: fortan1979@mail.ru

Nikolai A. Chichenev, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair “Engineering of Technological Equipment”, National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS)

ORCID: 0000-0002-9019-4675

E-mail: chich38@mail.ru

Sergei M. Gorbatyuk, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair “Engineering of Technological Equipment”, National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS), Vyksa Branch of the National University of Science and Technology “MISIS”

ORCID: 0000-0002-4368-5965

E-mail: sgor02@mail.ru

Tat'yana Yu. Gorovaya, Deputy Director, Vyksa Branch of the National University of Science and Technology “MISIS”

E-mail: gorovat@mail.ru

Aleksandr N. Fortunatov, Assist. Prof. of the Chair “Technology and Equipment for Metal Forming”, Vyksa Branch of the National University of Science and Technology “MISIS”

E-mail: fortan1979@mail.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Чиченев Н.А. – формирование идеи работы, научное руководство.

Горбатюк С.М. – поиск и анализ опубликованной информации.

Горвая Т.Ю. – формирование цели и задачи исследования, подготовка текста, корректировка выводов.

Фортунатов А.Н. – анализ результатов исследований, формирование выводов, окончательное редактирование текста.

N.A. Chichenev – formation of the article idea, scientific leadership.

S.M. Gorbatyuk – search and analysis of the published information.

T.Yu. Gorovaya – setting the research goal and objectives, preparation of the text, conclusions correction.

A.N. Fortunatov – analysis of research results, conclusions formation, final editing of the text.

Поступила в редакцию 27.07.2021

После доработки 04.10.2021

Принята к публикации 25.11.2021

Received 27.07.2021

Revised 04.10.2021

Accepted 25.11.2021