

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**

**Администрация Правительства Кузбасса**

**Научно-образовательный центр мирового уровня «Кузбасс»**

**Сибирский государственный индустриальный университет**

*Посвящается 100-летию  
со дня рождения ректора СМИ,  
доктора технических наук,  
профессора Н.В.Толстогузова*

**МЕТАЛЛУРГИЯ:  
ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО  
«Металлургия – 2021»**

*Труды*

*XXII Международной научно-практической конференции*

*10 – 11 ноября 2021 г.*

*Часть 2*

**Новокузнецк  
2021**

## Редакционная коллегия

д.т.н., академик РАН Л.А. Смирнов, д.т.н., доцент А.Б. Юрьев,  
д.т.н., профессор Н.А. Козырев, д.т.н., профессор Е.В. Протопопов,  
д.т.н., профессор А.Р. Фастыковский, к.т.н. Е.Н. Темлянцева,  
д.т.н., доцент В.В. Зимин, д.т.н., профессор А.Г. Никитин,  
к.э.н., доцент Ю.С. Климашина

М 540      **Металлургия : технологии, инновации, качество : труды XXII Международной научно-практической конференции. В 2 частях. Часть 2 / под общ. ред. А.Б. Юрьева, Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2021. – 347 с. : ил.**

Труды конференции включают доклады по актуальным вопросам теории и технологии процессов сварки, порошковой металлургии, получения композиционных материалов и покрытий, тепло- и массопереноса в металлургических процессах и агрегатах, ресурсо- и энергосбережения, экологии и утилизации отходов, охраны труда, автоматизации и моделирования металлургических процессов, инновационных металлургических технологий в машиностроении, экономико-управленческих проблем металлургических регионов.

**ОРГАНИЗАТОРЫ И ПАРТНЕРЫ КОНФЕРЕНЦИИ**

Администрация Правительства Кузбасса  
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»  
АО «ЕВРАЗ ЗСМК»  
АО «Русал-Новокузнецк»  
АО «Кузнецкие ферросплавы»  
АО «НЗРМК им. Н.Е. Крюкова»  
Ляонинский университет науки и технологии, г. Аньшань, КНР  
ОАО «Черметинформация»  
Издательство Сибирского отделения РАН  
Журнал «Известия вузов. Черная металлургия»  
Журнал «Вестник СибГИУ»  
Журнал «МАТЕС Web of Conferences »  
Научно-образовательный центр мирового уровня «Кузбасс»  
АО «Кузбасский технопарк»  
Западно – Сибирское отделение Российской Академии естественных наук  
Совет молодых ученых Кузбасса

## РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ МНЛЗ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЕЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Савельев А.Н., Северьянов С.С., Макаров А.В.

*Сибирский государственный индустриальный университет,  
Новокузнецк, Россия, Savelyev2000@mail.ru, alex\_vlad\_makarov@mail.ru*

**Аннотация.** Для оценки эксплуатационной надежности работы технологических агрегатов машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) применен количественный показатель, называемый «работоспособностью». Данный показатель характеризует способность технического изделия выполнять возложенную на него работу с определенной вероятностью, или вероятность того, что данный объем работы будет выполнен. В работе, используя статистический материал, полученный в течение 15 лет эксплуатации машины непрерывного литья заготовок, оценена работоспособность входящих в МНЛЗ агрегатов. При этом все агрегаты были разделены на три принципиально отличающиеся по условиям их назначения группы. Работоспособность каждой из групп агрегатов оценена абсолютными и относительными величинами. При оценке работоспособности агрегатов МНЛЗ в абсолютных величинах наибольшей работоспособностью обладают агрегаты, работающие с жидким металлом. Величина работоспособности в относительных единицах в среднем у всех групп агрегатов практически одна и та же, что позволяет использовать этот показатель для оценки, как элементов МНЛЗ, так и всей МНЛЗ в целом.

**Ключевые слова:** работоспособность, надежность, машина непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), технологическое оборудование, показатель работоспособности.

## EFFICIENCY OF CCM ELEMENTS DURING ITS LONG-TERM OPERATION

Savelyev A.N., Severyanov S.S., Makarov A.V.

*Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia  
Savelyev2000@mail.ru, alex\_vlad\_makarov@mail.ru*

**Abstract.** To assess the operational reliability of the technological units of the continuous casting machine (CCM), a quantitative indicator called "operability" was used. This indicator characterizes the ability of a technical product to perform the work assigned to it with a certain probability, or the probability that a given amount of work will be performed. In this work, using the statistical material obtained during 15 years of operation of the continuous casting machine, the operability of the units included in the continuous casting machine was evaluated. At the same time, all units were divided into three groups that fundamentally differ in terms of their designation. The performance of each of the groups of units is assessed by absolute and relative values. When assessing the performance of CCM units in absolute terms, units operating with liquid metal have the greatest performance. The value of working capacity in relative units on average for all groups of aggregates is practically the same, which makes it possible to use this indicator to assess both the elements of the continuous casting machine and the entire continuous casting machine as a whole.

**Key words:** efficiency, reliability, continuous casting machine (CCM), technological equipment, performance indicator.

Показатели надежности технического состояния машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) должны быть связаны с тем, что данное оборудование работает в непрерывном режиме и взаимодействует с жидким металлом. Любые простои такого оборудования приводят не только к значительным финансовым потерям, но и к сбоям организованного в цехе

технологического процесса [1-2] Формируются характеристики надежности МНЛЗ на стадии проектирования оборудования. Но во время проектирования таких сложных технологических линий (ТЛ), как МНЛЗ группа проектировщиков не может полностью учесть условия, в которых технологические агрегаты будут работать. В силу этого все без исключения технологические линии после их запуска проходят период доводки своих конструктивных и эксплуатационных параметров. Средний период доводки оборудования до стабильного состояния занимает 5-7 лет [3,4]. За это время элементы ТЛ приспособляются персоналом для эксплуатации в конкретных условиях, что позволяет вывести МНЛЗ на стабильный режим работы. Но при проектировании новой машины значительная часть наработанных при предшествующей доводке оборудования знаний теряется.

Идея работы заключается в изучении полученных характеристик МНЛЗ после ее доводки и их использование при последующем проектировании и создании новых МНЛЗ.

Работа нацелена на то, чтобы используя комплексный показатель описать особенности эксплуатационной надежности элементов технологического оборудования МНЛЗ. При этом показатель должен обладать способностью переносить параметры принципиальных основ надежности от действующей МНЛЗ к проектируемой.

*Задачи работы.* Выбрать соответствующий цели работы показатель надежности элементов технологической линии. Собрать необходимый статистический материал, характеризующий эксплуатационную надежность элементов МНЛЗ. Выработать показатели эксплуатационной надежности, которые могли бы стать основой разработки следующих МНЛЗ

Среди показателей, характеризующих надежность элементов ТЛ, существует показатель, который называется показателем работоспособности технических элементов [5-9]. Сформирован данный показатель был исходя из того, что целью создания технологического оборудования непременно является выполнение конкретного объема работы. В этом случае для оценки эффективности эксплуатации оборудования необходим количественный показатель его работоспособности в смысле способности агрегата выполнить возложенный на него объем работы. Показатель работоспособности комплексный и включает качественную и количественную составляющие

Выбор качественного показателя исходил из того, что механическая система должна выполнять работу. Способность выполнять возложенные на систему задачи или способность оставаться в работоспособном состоянии является ее коренным свойством, или качеством. В технике эта способность работать без поломок, называется безотказностью машины [6] и оценивается вероятностью сохранения у машины работоспособности  $F$ . Что касается количественного показателя, то он основан на том, что при работе технологического оборудования все элементы системы передают движение друг другу в направлении от двигателя к исполнительному органу. Во время передачи движения каждый элемент сам деформируется, накапливая в своем материале внутренние повреждения [10-12]. При этом относительный объем накопленного повреждения  $V_i$  при законе накопления, близком к линейному, равен относительному объему выполненной работы  $A_i = a_i / a_{max}$ . Равенство соотношений повреждений и выполненной работы позволяет в качестве количественной величины принять работу, которую эта машина совершает во время своего функционирования [9].

Наличие количественного и качественного параметров машины дает возможность сформировать меру процесса потери ее работоспособности [10]. Способность выполнять работу или вероятность того, что данная работа будет выполнена, характеризует качество машины. Объем накопленных в машине перемещений (повреждений) или объем выполненной работы - это количественный показатель протекающих в машине процессов. Тогда способность выполнить определенный объем работы или работоспособность  $M$  проявляется в вероятности  $F$  того, что при данном объеме накопленных движений или повреждений  $V_i$  машина остается работающей, или, что равнозначно, вероятность того, что данный объем работы  $A$  будет выполнен. В таком случае работоспособность машины - это способность выполнить возложенный на нее объем работы  $A$  с вполне определенной вероятностью  $F$  [13]

Построение кривой работоспособности начинается с нахождения вероятности отказов

$Q=Q(t)$  и работы  $A=A(t)$ , которую техническая система выполнила. Эти кривые пересчитываются в зависимости с относительной временной координатой  $T= t/t_{max}$ , т.е. в зависимости  $Q=Q(T)$  и  $A=A(T)$ , затем находится  $P(T)=1-Q(T)$  и определяется мера работоспособности  $M=P(T) A(T)$ . Характер изменения работоспособности имеет параболическую форму с максимумом, ограничивающим степень рационального использования машины [6,9,11].

Метод решения. Кривые работоспособности в данной работе определяются на основе статистическо-вероятностного материала агрегатов и машин технологической линии. В качестве объекта исследования использовались агрегаты, входящие в машину непрерывного литья заготовок изготовленную фирмой УЗТМ и эксплуатируемую в условиях ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» с 1990года (рисунок 1). Из оборудования 4-х ручьев МНЛЗ анализировалась работа оборудования только одного ручья. Решалась эта задача на основе собранного в период с 2001 по 2015 годы статистического материала по надежности функционирования МНЛЗ, т.е. в период стабильной ее эксплуатации. Для контроля общего состояния оборудования на протяжении всего периода сбора статистического материала, осуществлялась оценка коэффициента технического использования МНЛЗ. Данный показатель характеризовал уровень надежности всей технологической линии в целом и на протяжении всего срока сбора статистической информации оставался в пределах 0.95 – 0.97.

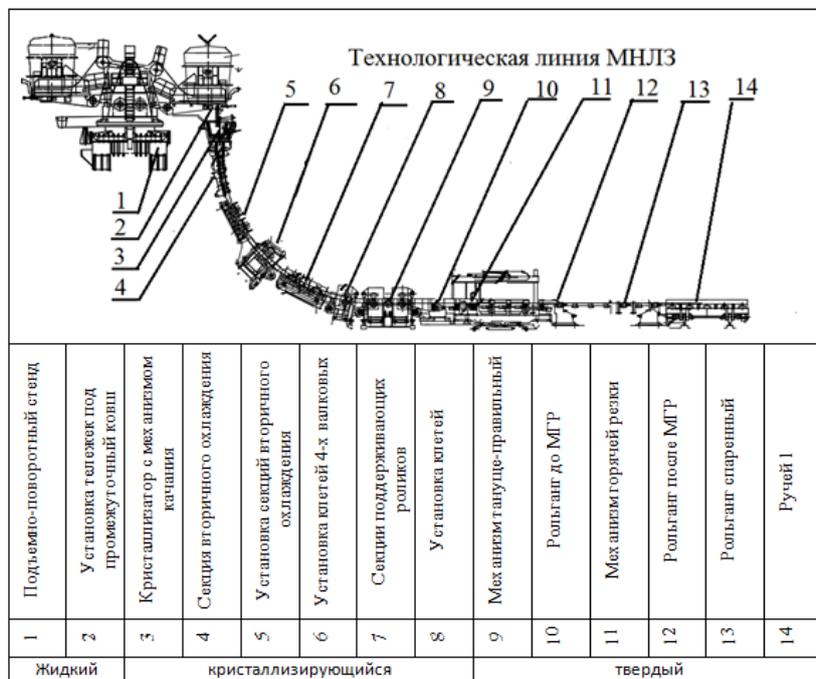


Рисунок 1 -Последовательность расположения агрегатов в технологической линии МНЛЗ

Оценка работоспособности МНЛЗ начинается с ее декомпозиции, как целого. Согласно теории формирования сложных технических систем [11,12], процесс декомпозиции сложных систем реализуется путем многократного разложения элементов того или иного уровня сложности системы по качественному параметру на три составляющие этого уровня группы [12]. Используя данное представление о структуре уровней агрегатов сложной технической системы и опираясь на качественный показатель, в результате которого тот или иной вид оборудования используется в данной технологической линии, выполнено выделение трех групп агрегатов технологической линии МНЛЗ. Особенностью каждой из групп является то, что по мере продвижения металла от одной группы агрегатов к следующей группе, свойства его в силу того, что он переходит от жидкой фазы к твердой, меняются. В связи с этим тот или иной агрегат линии должен выполнять свои функции в различных технологических условиях. От этого зависят его конструктивные особенности и характеристики эксплуатации, а значит и показатель его работоспособности. Так, первая группа агрегатов работает с жидким металлом и их качественные характеристики должны обеспечивать технологические

операции в температурных условиях, соответствующих температуре жидкой стали (рис.1). При этом данные агрегаты перемещают жидкую среду и в силу этого, имеют свои конструктивные особенности, определяющие и вид, и методы проектирования. Третья группа агрегатов работает уже с твердым металлом, испытывает воздействие твердой среды и должна в связи с этим обладать соответствующим набором технических параметров эксплуатации данного вида оборудования. Показатели работоспособности второй группы агрегатов, группы, которая работает с затвердевающим металлом, должны обладать рядом параметров соответствующих как первой, так и третьей группе агрегатов. Для каждого из агрегатов, используя статистический материал, определен характер распределения срока службы до отказа агрегатов технологической линии МНЛЗ. Выполненная таким образом декомпозиция и статистическая оценка долговечности агрегатов позволяет определить показатели работоспособности входящих в ту или иную группу агрегатов.

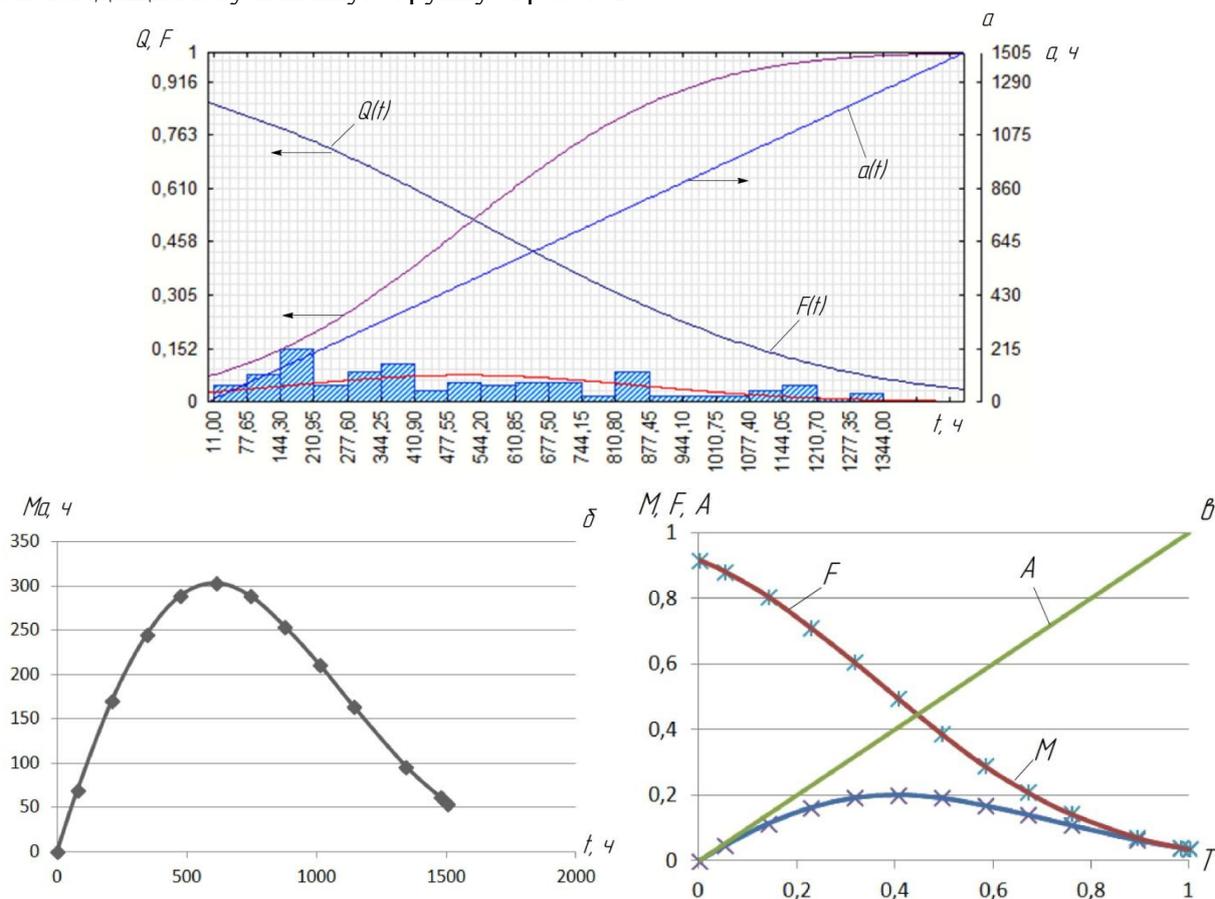


Рисунок 2 - Пример построения абсолютной  $M_a$  и относительной  $M$  кривых работоспособности технологического агрегата МНЛЗ:  $Q(t)$  – вероятность отказов технологического агрегата;  $F(t)$  – вероятность безотказной работы технологического агрегата;  $a(t)$  – работа, выполняемая агрегатом, час.  $A$  относительная величина работы, выполняемой технологическим агрегатом  $T$  - время в относительных единицах

При анализе статистического материала, касающегося сроков службы каждого из рассматриваемых агрегатов технологической линии [11,12], получены распределения частоты встречаемости сроков службы, распределение плотности вероятности сроков службы каждого из агрегатов и зависимости вероятности безотказной работы агрегатов МНЛЗ. Пример статистических данных и вероятностные модели одного из агрегатов технологической линии приведен на рисунке 2.а. Построение кривых работоспособности начиналось с определения зависимости между надежностью  $Q$  и объемом выполненной работы  $a$  или сроком службы  $t$ . На основе вероятностной модели, были построены кривые  $Q(t)$ ,  $F=1-Q(t)$  и продолжительности работы агрегата  $a(t)$ . При этом исходили из того, что продолжительность работы

при непрерывном режиме эксплуатации технологической линии имеет линейный характер. На основе полученных зависимостей определяется мера работоспособности  $M=F(t)*a(t)$  и  $M=F(T)*A(T)$ , где  $t$  - время в абсолютных единицах,  $T$  – время в относительных единицах. Данная мера имеет параболическую форму с точкой максимума, позволяющей ограничить область рациональных значений срока службы агрегатов между ремонтами.

Определение максимальной работоспособности, в абсолютных и относительных величинах, показано на рисунке 3.

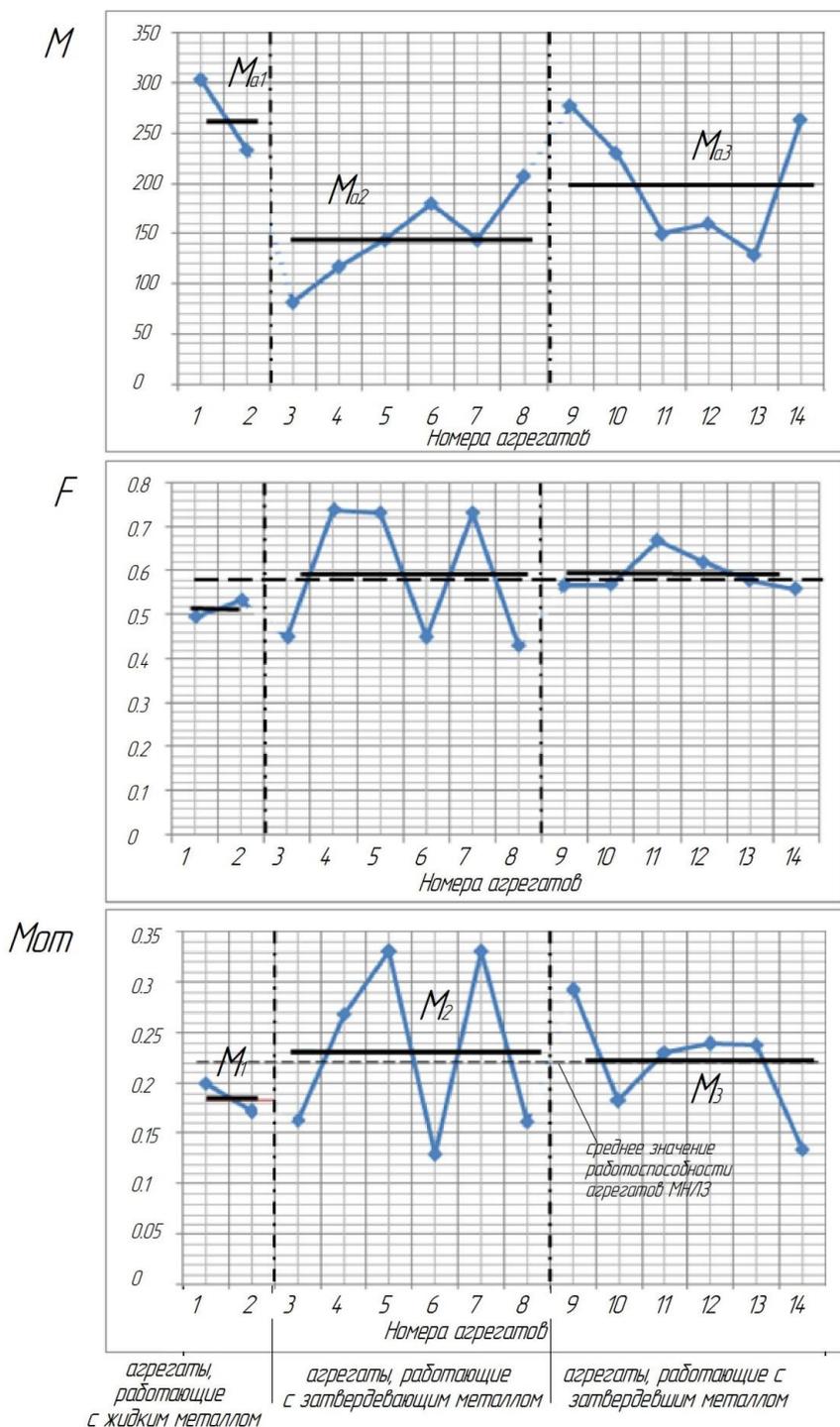


Рисунок 3 - Характер распределения значений оптимальной работоспособности и соответствующей ей надежности между агрегатами технологической линии МНЛЗ: а – работоспособность агрегатов, час.; б – работоспособность агрегатов в относительных единицах; в – вероятность безотказной работы, соответствующая значению оптимальной работоспособности

Из характера распределения максимальной работоспособности агрегатов МНЛЗ в абсолютных единицах (рис.3.а) следует, что максимальной работоспособностью в среднем в  $M_{a1}=270$  часов и безотказностью  $F_1=0.51$  обладает первая группа агрегатов – группа, работающая с жидким металлом. Третья группа агрегатов имеет среднюю рациональную работоспособность порядка  $M_{a3}=200$  часов со средней безотказностью  $F_3=0.6$ . Агрегаты второй группы, группы, работающей с затвердевающим металлом, имеют среднюю рациональную работоспособность в  $M_{a2}=150$  часов и среднюю безотказность порядка  $F_2=0.6$ .

Для выявления общих закономерностей распределения показателя работоспособности между агрегатами технологической линии МНЛЗ в работе было выполнено определение работоспособности в относительных единицах. Для этого объем выполняемой объектом работы представлен в относительных единицах  $A = a_i/a_{\max}$ . Характер распределения максимального значения работоспособности агрегатов МНЛЗ в относительных единицах

**Выводы.** Показатель работоспособности, как способности выполнять возложенную на агрегат работу или вероятность того, что данная работа будет выполнена, комплексно характеризует качество машины. Данный показатель имеет оптимальное значение, при переходе через которое способность машины выполнить возложенный на нее объем работы начинает снижаться. Точка оптимума продолжительности работы машины ограничивает рациональный временной участок ее использования без ремонта с максимальной при этом эффективностью. При оценке работоспособности агрегатов МНЛЗ в абсолютных величинах наибольшей работоспособностью обладают агрегаты, работающие с жидким металлом, наименьшей – агрегаты, работающие с затвердевающим металлом. Величина работоспособности в относительных единицах в среднем у всех групп агрегатов практически одна и та же, что позволяет использовать этот показатель в ряде моментов разработки новых МНЛЗ.

#### Библиографический список

1. Анцупов А.В., Анцупов А.В. (мл.), Анцупов А.П. Обеспечение надежности узлов трения машин на стадии проектирования. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. – 293 с.
2. Фишер Л., Бауш И., Хюллен И., Фрелинг К., Ржепчик М., Брант Т., Кноп И., Брасс Х.-Г. Концепции перспективной модернизации с применением апробированной технологии непрерывной разливки стали.// Черные металлы. – 2018. - №9. – с.40-47
3. Савельев А.Н. О методологических основах проектирования надежного технологического оборудования. // Известия ВУЗов. Черная металлургия 1998. №6. –С.22 – 26.
4. Савельев А.Н. Теория работоспособности технологических машин/ А.Н.Савельев . – Кемерово: Кузбассвуз издат, 2008. – 225 с.:ил.
5. Савельев А.Н. Работоспособность оборудования, как комплексный критерий // Известия ВУЗов. Черная металлургия 1991. №6. –С.102 – 104.
6. Савельев А.Н. Использование критерия работоспособности деталей в расчетах на долговечность. // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 1991. №10. – С.84 – 86.
7. Оценка надежности машин и оборудования: теория и практика: Учебник / И.Н. Кравченко, Е.А. Пучин, А.В. Чепурин и др.; под ред. проф. И.Н. Кравченко. – М.: Альфа-М; ИНФРА-М, 2012. – 336 с.
8. Савельев А.Н. Теория работоспособности технологических машин/ А.Н.Савельев . – Кемерово: Кузбассвуз издат, 2008. – 225 с.:ил.
9. Савельев А.Н. Структурные особенности устойчиво функционирующей сложной технической системы // Изв. вуз. Черная металлургия. 1996. № 12. С. 53 – 58.
10. Савельев А.Н. Проектирование гомеостазных прокатных комплексов // Изв.вуз. Черная металлургия. 1991. №12. С.78 – 82.
11. Савельев А.Н., Северьянов С.С., Савельева А.В. Моделирование эксплуатационной надежности агрегатов технологической линии МНЛЗ, как сложной технической системы.// Вестник Сибирского государственного индустриального университета №2 (16), 2016. С.23 – 28.