

05.16.04

Л 268

ЧЕЛЫБИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ЛАСКОВ Николай Андреевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЫХ БИЛ
С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ

Специальность 05.16.04 - Литейное производство

А в т о р е ф а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челыбинск - 1990

Работа выполнена на кафедре литейного производства Челябинского государственного технического университета.

Научный руководитель — доктор технических наук,
профессор В.М. АЛЕКСАНДРОВ

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор В.А. ГРАЧЕВ,
кандидат технических наук,
доцент В.Р. БАЛИНСКИЙ

Ведущее предприятие — конструкторско-технологический институт
автомобильного машиностроения (г. Челябинск)

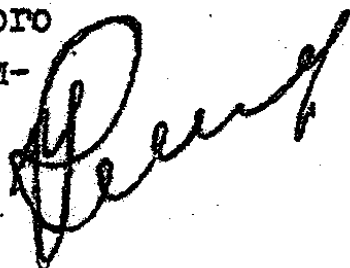
Защита состоится "28" декабря 1990 г. в 15 час.00 мин.
на заседании специализированного совета К.053.13.06 Челябинского
государственного технического университета.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенный гербовой печатью,
просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76,
ЧГТУ, Ученый Совет университета, тел. 39-91-23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЧГТУ.

Автореферат разослан "24" ноября 1990 г.

Ученый секретарь специализированного
совета К.053.13.06, кандидат техни-
ческих наук — доцент



Б.Э. Клещкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Ежегодная потребность теплоэнергетики СССР в билах для молотковых мельниц превышает 3,5 млн. штук, что по затратам на их изготовление составляет около 12 млн. руб.

В настоящее время для повышения срока службы бил наиболее широко используют лобовую наплавку твердыми износостойкими сплавами типа "Сормайт", содержащими до 30% хрома и до 5% никеля. Наплавленные била отличаются высокой износостойкостью и значительный срок службы. Однако они недостаточно стойки против ударных эксплуатационных нагрузок, что обуславливает нестабильность срока их службы. Так по данным Челябинэнерго продолжительность работы наплавленных бил в 25 % эксплуатационных кампаний составляет менее 0,6 ее среднестатистического значения, а в 10% кампаний -- менее 0,4.

Поэтому заслуживает особого внимания использование для молотковых мельниц бил, армированных литыми элементами из износостойких сплавов. Била такой конструкции лишены указанных выше недостатков. Однако, несмотря на очевидные преимущества, они пока не получили широкого распространения в массовом производстве. Это связано с тем, что имеющиеся в литературе данные о целесообразности использования бил, армированных вставками, весьма противоречивы и не позволяют в полной мере реализовать их преимущества.

Учитывая постоянно возрастающую потребность в билах для ТЭС страны, работы в направлении совершенствования конструкции и технологии бил, армированных литыми износостойкими элементами, весьма актуальны.

Работа выполнялась в соответствии с координационным планом НИР АН СССР на 1981-1988 гг., 1988-1990 гг. по решению пресламы 2.25.1.5, раздел 01.07.

Цель работы. Изучение влияния основных конструктивно-технологических факторов на дефектность и служебные свойства бил, армированных вставками из хромистого чугуна, и разработка с учетом полученных результатов их конструкции и технологии, удовлетворяющих условиям массового производства и эксплуатации.

Для достижения указанной цели в работе были поставлены следующие задачи:

- уточнить параметры поверхностных и определить параметры объемных эксплуатационных нагрузок на била молотковых мельниц;
- исследовать влияние конструктивных факторов на дефектность высокоармированных отливок и на служебные свойства бил, установить оптимальную конструкцию армирующей и матричной частей бил;
- разработать способ нанесения и состав промежуточного покрытия, обеспечивающих трещиностойчивость и достаточную прочность механической связи частей армированных отливок;
- изучить совместное влияние углерода, хрома, кремния на твердость и ударную вязкость, выявить пакет составов экономнолегированных матричных сталей для бил, обеспечивающих высокий уровень эксплуатационных свойств;
- разработать и освоить в массовом производстве конструкцию и технологию усовершенствованных бил, армированных вставками из хромистого чугуна.

Научная новизна. Изучено влияние поверхностных нагрузок на характер износа бил. Построена эпюра поверхностных нагрузок на било. Разработана методика, определены параметры и эпюра объемных нагрузок на било. Обоснована наиболее эффективная с точки зрения износостойкости и надежности конструкция армированного била молотковой мельницы. Получены количественные данные по эффективности армирования литых деталей литыми вставками из хромистого чугуна в сравнении с лобовой наплавкой для условий значительных ударно-абразивных нагрузок.

Создана методика для определения прочности на растяжение металлической связи между матричной и армирующей частями отливок. Определена область существования и величина технически значимой металлической связи между армирующей и матричной частями отливок массой до 15 кг типа: стальная матрица - вставка из хромистого чугуна. Показано отрицательное влияние промежуточных прослоек на основе дисперсных металлов на прочность металлической связи.

Установлены закономерности влияния профиля литой армирующей вставки из хромистого чугуна на эффективность армирования литых деталей, эксплуатируемых в условиях ударно-абразивного нагружения. Получены уравнения регрессии, описывающие влияние основных геометрических параметров высокоармированных отливок на их трещиностойчивость и прочность механического зацепления вставки.

Показано положительное влияние промежуточных прослоек пригарной природы на основе дисперсных металлов на прочность механического заземления вставки и трещиностойкость высокоармированных отливок.

Обоснованы наиболее эффективные механизмы податливости, природа и состав податливой промежуточной прослойки для высокоармированных отливок. Предложен новый способ получения литых армирующих вставок для отливок с податливым покрытием пригарной природы.

Получены данные о влиянии углерода в пределах 0,6...1 %, кремния 0,38...0,8 %, хрома 0,23...3 %, температуры отпуска 400...650 °С на ударную вязкость и твердость стали, содержащей также 0,8...0,9 % марганца и 0,002 % бора.

Практическая ценность работы. На основании проведенных исследований установлено влияние конструкции (способа армирования) лопасти била на характер и параметры их изнашивания. Создана программа для ЭВМ расчета конструкции равнопрочного по длине литого била, армированного литой вставкой с заданным коэффициентом запаса прочности по максимальной штатной ударной нагрузке. Установлены возможность и условия стабильного получения пригара равномерной толщины от 2 до 5 мм на мелких чугунных отливках с помощью специальных формовочных композиций на основе дисперсных металлов. Разработаны составы "пригарных" формовочных композиций, обеспечивающих получение податливых покрытий на поверхности отливок армирующих вставок. Создана программа для ЭВМ, позволяющая выбирать оптимальный состав и температуру отпуска экономолегированной стали для литых деталей, работающих в условиях ударно-абразивного нагружения.

Для условий массового производства разработаны эффективные конструкция и технология изготовления литых высокоармированных бил.

Реализация работы. Разработанные конструкция и технология изготовления бил молотковых мельниц, армированных литыми вставками из хромистого чугуна прошли опытно-промышленные испытания и освоены в массовом производстве и эксплуатации с годовым экономическим эффектом 71,5 тыс. рублей.

Основные положения, представляемые к защите:

1. Результаты исследования и определения параметров повархностных и объемных нагрузок на била молотковых мельниц, выбор и расчет на этой основе наиболее рациональной конструкции армированного износостойким элементом била.
2. Данные об области существования и величине технически значимой по прочности металлической связи частей стальных отливок массой до 15 кг, армированных вставками из хромистого чугуна.
3. Зависимости, описывающие влияние основных геометрических параметров армированных отливок на прочность механической связи стальной матрицы с литой вставкой из хромистого чугуна, трещиностойчивость и служебные свойства армированных отливок.
4. Обоснования выбора механизма податливости и состава промежуточных податливых покрытий для высокоармированных отливок. Новый способ получения армируемых вставок с защитным покрытием природной природы.
5. Зависимости, описывающие влияние углерода, кремния, хрома и температуры отпуска на ударную вязкость, твердость, ударно-абразивную износостойкость литой экономнолегированной стали.
6. Конструкция и технология массового производства высокоармированных отливок бил молотковых мельниц.

Апробация работы. Материалы диссертации доложены и обсуждены на научно-технических конференциях: "Механизация и повышение эффективности технологических процессов производства отливок металлургического оборудования" (Днепропетровск, 1982 г.), "Композиционное литье - прогрессивный способ изготовления деталей" (Одесса, 1982 г.), "Улучшение качества металла и его экономия в литейном производстве за счет применения новых модификаторов для серого и высокопрочного чугуна" (Челябинск, 1984 г.), "Новые металлургические и трудосберегающие технологические процессы в литейном производстве" (Челябинск, 1984 г.), "Совершенствование технологии выплавки чугунов" (Устинов, 1985 г.), "Участие молодых ученых и специалистов в реконструкции и модернизации предприятий, во внедрении новой техники и технологии" (Челябинск, 1986 г.), "Прогрессивные технологии изготовления форм и стержней для производства отливок" (Челябинск, 1990 г.).

Публикация материалов работы. По материалам диссертации опубликовано 10 печатных работ, получено 3 авторских свидетельства и одно положительное решение на выдачу авторского свидетельства.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы, включающего 126 наименований и трех приложений, изложена на 130 страницах машинописного текста, иллюстрирована 64 рисунками и 12 таблицами.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Технология изготовления отливок бил молотковых углеазмольных мельниц, армированных литыми вставками из износостойких сплавов, включает изготовление отливок армирующих вставок, установку их в полость литейной формы и заполнение ее матричным расплавом.

Срок службы и надежность таких бил зависят от параметров эксплуатационных нагрузок, материалов и конструкции армированного рабочего тела (лопасти), структуре промежуточной зоны арматура-матрица, а также от режима заполнения формы матричным расплавом.

При исследовании влияния конструктивно-технологических факторов армированных отливок на их качество и служебные свойства, авторы большинства работ основное внимание уделяли изучению металлической связи между матричной и армирующей частями и недостаточно полно раскрывали возможности механического закрепления вставок за счет геометрических параметров армированного тела и промежуточных прослоек (защитных покрытий) на поверхности армирующих вставок. Между тем указанные факторы могут быть весьма эффективно использованы в обеспечении высокой надежности и износостойкости высокоармированных отливок, работающих под воздействием ударно-абразивных нагрузок.

Исследование влияния эксплуатационных нагрузок на бил молотковых мельниц

Первоначально изучали влияние на бил повархностных нагрузок. С помощью специальной методики испытаний на промышленных мельницах получены опытные данные (табл. I) по важнейшим параметрам изнашивания и долговечности трех наиболее "конкурентноспособных" конструктивных разновидностей бил, а именно: монометаллических

(монолитных), с лобовой износостойкой наплавкой из порошковой ленте Ш АН-10, армированных литыми вставками из износостойкого хромистого чугуна ЧХ12Г5. Основу бил изготавливали из стали 35Л. Материалы наплавки и вставки, а также степень армирования выбирали с учетом известных рекомендаций и практических данных. Параметрами служили скорость изнашивания по массе, по длине и толщине лопасти. Долговечность работы бил оценивали величиной приведенного срока службы.

Таблица I

Служебные свойства бил различных конструкций

Тип била	Степень армирования, %	Скорость изнашивания			Срок службы приведенный, ч
		по массе, г/ч	по длине, мм/ч	по толщине, мм/ч	
Монометаллические	0	5,8	0,13	0,012	418
Наплавленные	47,5	4,0	0,060	0,0165	625
Со вставкой	29,0	4,97	0,095	0,010	504

С учетом указанных выше параметров и макро рельефа поверхности построена эшера поверхностных эксплуатационных нагрузок на биле.

Установлено, что в зависимости от конструкции лопасти биле не только укорачивается, но и утоняется. Значительная скорость изнашивания по длине лопасти и по массе является недостатком монометаллических бил. Микровыкрашивание и сколы наплавленного металла являются недостатками бил с лобовой наплавкой. Биле со вставкой сочетает в себе комплекс положительных свойств - меньше, чем монометаллическое, изнашивается по длине и по массе, устойчивее, чем наплавленное, против сколов и микровыкрашивания металла с поверхности лопасти. Можно предположить, что с увеличением степени армирования должен повыситься и срок службы биле со вставкой.

Следовательно, для повышения эксплуатационных свойств бил такой конструкции лобовой и тыльной слои должны быть выполнены из прочного сплава, а сердцевинный из твердого абразивно-износостойкого. При этом должно соблюдаться строго определенное соотношение толщины слоев, которые выдерживали бы в процессе эксплуатации воздействие как ударных, так и абразивных нагрузок.

С целью оптимизации конструкции била важно было определить параметры объемных нагрузок в процессе эксплуатации. С помощью экспериментальной методики, основанной на определении напряжений по месту образования пластического шарнира в лопастях била под действием ударных нагрузок, найдены параметры штатных эксплуатационных ударных нагрузок на специальных утоненных образцах монометаллических бил для одного типоразмера мельниц. С помощью полученных данных и использования закономерностей теории соударения тел представлялась возможность выполнения аналитического расчета максимальной штатной (неаварийной) силы P и продолжительности удара τ в углеразмольных мельницах любого типоразмера:

$$P = \left(\frac{m V^2}{m_0 V_0^2} \right)^{0,6} P_0 ; \quad \tau = \left(\frac{m}{m_0} \right)^{0,4} \left(\frac{V_0}{V} \right)^{0,2} \tau_0 ,$$

где m, V - масса и скорость расчетных бил;
 m_0, V_0 - соответственно масса (7 кг) и линейная скорость била (64 м/с) в экспериментальном определении параметров ударных нагрузок;
 P_0, τ_0 - соответственно наибольшая штатная сила удара (60 кН) и его продолжительность ($7,35 \cdot 10^{-3}$ с), определенные экспериментально.

Установлено, что величина максимального штатного удара и его продолжительность для широко используемых на ТЭС СССР мельниц с диаметром ротора 1550...1650 мм и 2000...2600 мм соответственно равны: 50...60 кН; $7,5 \cdot 10^{-3}$ с и 118...120 кН; $9,6 \cdot 10^{-3}$ с.

Используя полученные данные, обосновали схему нагружения била и эпюры поперечных сил и изгибающих моментов. Затем проверили рациональность конструкции наиболее широко используемых в промышленности бил углеразмольных мельниц.

Расчеты показали, что коэффициенты запаса прочности в них по длине изменяются в большом интервале и в наиболее слабых сечениях достигают значений 0,5. Особенно сильные провалы по запасу прочности характерны для отдельных сечений рабочей части лопасти наплавленных бил. Поэтому используя значения максимального штатного удара и специально разработанную программу компьютерного расчета удалось определить размерные параметры равнопрочной по длине конструкции била, армированного вставкой для мельниц с

диаметром ротора 1550...1660 мм и 2000...2600 мм с коэффициентом запаса прочности до 1,3. Установлено, что для обеспечения этого условия конструкция лопастей должна иметь:

- коробчатую форму поперечного сечения матричной части;
- армирующую часть (износостойкую вставку), выполненную в форме продольно расположенного клина вершиной в сторону проушины;
- тыльные продольные ребра переменной высоты, увеличивающиеся в сторону проушины.

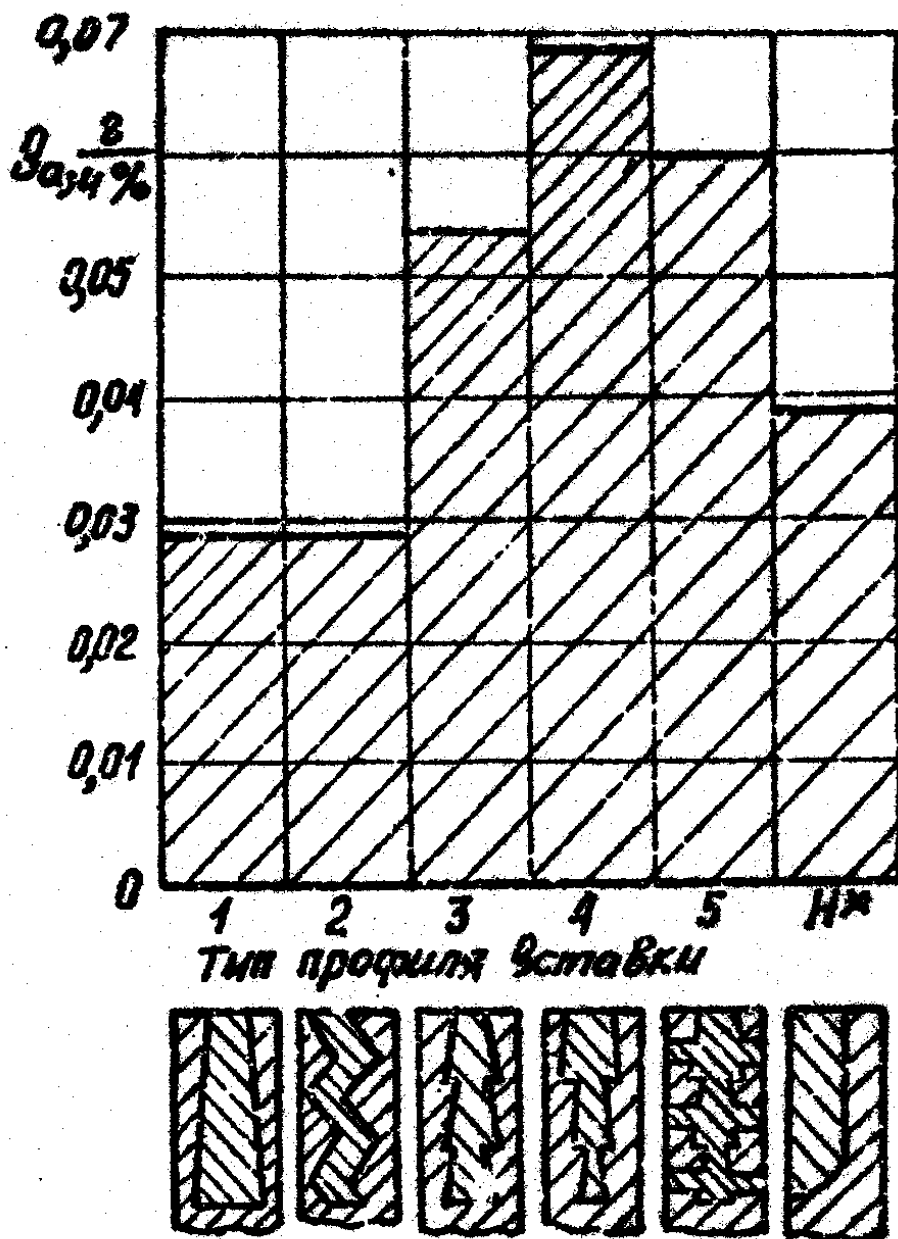
Для обеспечения надежной работоспособности такого била необходимо было решить вопрос закрепления в нем вставки указанной конструкции.

Исследование влияния конструктивно-технологических параметров на служебные свойства бил, армированных литыми вставками из хромистого чугуна

С помощью специально разработанной методики первоначально исследовали прочность металлической связи на растяжение между армирующими и матричными элементами в отливках. Определено, что технически значимая прочность имеет место при степени армирования не выше 7...8 %. Известные составы промежуточных присловок на основе дисперсных материалов между вставкой и матричной сталью не позволяют повысить степень армирования отливок, при которой имеет место технически значимая прочность металлической связи. Показана нецелесообразность создания инженерной методики расчета прочности металлической связи армирующей и матричной частей и использования этого типа связи для обеспечения сцепления элементов армированных отливок из-за узости оптимального интервала технологических параметров.

Поэтому дальнейшие исследования были направлены на изучение возможности закрепления вставки с помощью ее механической связи с основой била. Механическую связь обеспечивали за счет придания определенной формы продольного профиля армирующей вставки (см. рисунок). Испытания бил, армированных вставками различных конструкций проводили на промышленных мельницах с диаметром ротора 1,5 м. Масса литых бил во всех экспериментах оставалась постоянной (7 кг), а степень их армирования изменялась от 30 до 50 %. Профили 1, 2, 3 (см. рисунок) выбирались на основании литературных

Гистограмма эффективности армирования
в зависимости от формы продольного профиля вставки



ж - наплавка

данных, а 4-5 - с учетом признаков рациональной конструкции била. Установлено, что форма профиля вставки является значимым фактором эффективности вставки в повышении срока службы бил. Профили 4,5, соответствующие в.с. СССР № 1037948, № 1184560 обеспечивают наибольшую эффективность армирования \bar{E}_a . Причем максимальный срок службы бил в этом случае достигается при степени их армирования 40...48 %.

Однако эти результаты не были полностью подтверждены при увеличении массы била до 15 кг. При изготовлении таких бил наблюдалось значительное поражение трещинами, что приводило к снижению их эксплуатационных характеристик. Применение известных типов промежуточных прослоек между вставкой и основой била позволило уменьшить пораженность отливок трещинами. Однако продолжительность эксплуатации за счет этого существенно повысить не удалось. При работе бил наблюдалось интенсивное выкрашивание вставок, что объяснили снижением прочности механической связи вставки с матричной сталью из-за нарушения сплошности переходной зоны. Поэтому был разработан новый способ получения армируемых вставок с защитным покрытием пригарной природы. Способ защищен а.с. СССР № 1435390 и заключается в создании защитного покрытия в процессе получения отливки вставки. Для этого литейную форму облицовывают специальной формовочной смесью из металлического наполнителя и неорганического связующего. Наполнитель состоит из тугоплавких и легкоплавких металлических частиц. В процессе заливки и охлаждения металла происходит приваривание тугоплавкого наполнителя к поверхности отливки. Легкоплавкие частицы наполнителя подплавляясь дополнительно цементируют на поверхности отливки тугоплавкие частицы и формируют таким образом слой равномерной толщины 2...5 мм, в зависимости от состава формовочной смеси.

После получения вставок с таким покрытием ее устанавливали в литейную форму била и заливали матричной сталью. Оказалось, что легкоплавкая часть покрытия повторно подплавляясь обеспечивает хорошую податливость и трещиностойкость отливок, а тугоплавкая — более высокую сплошность переходной зоны и прочность механической связи.

В основу выбора формовочных композиций для получения промежуточных прослоек такого типа положен механизм усадки при спекании пористых тел. Податливость прослойки достигается за счет усадки ее как пористого тела по механизму скольжения частиц в пустоты с участием жидкой фазы легкоплавкого компонента. Податливость усиливается явлением сверхпластичности таким систем. Теоретически обоснован и экспериментально определен состав податливой промежуточной прослойки, который включает твердый тугоплавкий металлический компонент в количестве 40...70% с разме-

ром зерен $0,1 \dots 1$ мм и температурой плавления близкой к температуре плавления металла вставки, твердый легкоплавкий металлический компонент в количестве $27 \dots 55\%$ с аналогичным размером зерен и температурой плавления $0,4 \dots 0,6 T_{\text{пл}}$ матричного сплава, неорганическое связующее (жидкое стекло) - $3 \dots 5 \%$.

Экспериментально установлена возможность стабильного получения пригара равномерной толщины на мелких чугуновых отливках с помощью формовочных композиций на основе дисперсных металлов: железа, алюминия, ферромарганца и ферросилиция. Показана нецелесообразность использования для этой цели меди, самофлюсующихся сплавов и феррохрома. Разработан ряд составов формовочных смесей, приемлемых для использования их в производственных условиях.

Чтобы иметь эффективный инструмент оптимизации конструкции бил в конкретных условиях производства методом многофакторного эксперимента исследовали влияние степени армирования x_1 , угла при вершине армирующего элемента x_2 , толщины промежуточной прослойки пригарной природы x_3 , поперечного габарита отливки x_4 на пораженность трещинами высокоармированных отливок y_1 и прочность механического зацемянения армирующей вставки y_2 , как определяющих уровень служебных свойств. В результате обработки экспериментальных данных получены следующие уравнения регрессии:

$$y_1 = 0,382 + 0,058x_1 - 0,105x_2 - 0,09x_3 + 0,025x_4 ;$$

$$y_2 = 1573 - 91x_1 - 33x_2 + 82x_3 + 260x_4.$$

Анализ уравнений свидетельствует о том, что нанесение пористой промежуточной прослойки пригарной природы, придание конусности армирующим вставкам позволяют уменьшить пораженность трещинами высокоармированных отливок. Поперечный габарит отливки, степень армирования и толщина промежуточной прослойки наиболее значительно влияют на прочность механического сцепления матрицы и арматуры. Полученные данные позволяют формализовать выбор оптимальных значений исследованных факторов и предопределять в конкретных условиях производства высокий уровень служебных свойств бил. Например, оптимальное сочетание высокой прочности зацемянения вставки и трещиностойкости отливок со $CA = 47 \%$ и поперечным габаритом 100 мм достигается, когда угол при вершине вставки составляет 3 градуса, а толщина промежуточной прослойки 3 мм,

Для отработки технологии литья при оптимальной степени армирования был вставками пятого типа (см. рисунок), важно было изучить влияние режима заполнения формы металлом на трещиностойкость и стабильность массы получаемых отливок. С этой целью исследовали четыре наиболее вероятных для условий массового производства разновидности литейных форм. Результаты исследований представлены в табл. 2, где C_T - степень поражения трещинами отливок; C_H - степень поражения отливок недоливами; m - среднеарифметическая масса отливок, кг; δ - среднеквадратичное отклонение от средней массы отливок, кг.

Таблица 2

Стабильность массы и дефектность отливок был в зависимости от технологического варианта

Номер варианта	Положение отливки в форме	Место подвода металла	Кол-во питателей	C_T	C_H	m , кг	δ , кг
1	На ребро	Торец лопасти	1	0,83	0,06	15,62	0,317
2	На ребро	То же	2	0,42	0,06	15,55	0,31
3	Плашмя	"	2	1,28	0,06	15,73	1,02
4	Плашмя	Проушина	2	2,07	0,10	15,70	1,079

Установлено, что наиболее высокое качество высокоармированных отливок типа клин в плите обеспечивается:

- подводом питания непосредственно в армированный узел;
- положением вставки на ребро;
- одновременным омыванием развитых поверхностей вставки расплавом при заполнении формы;
- постепенным увеличением площади контакта расплава с поверхностью вставки.

Выбор состава стали для изготовления основы был

Изучение влияния эксплуатационных нагрузок и опыт промышленной эксплуатации был показали, что сталь 35Л, широко используемая для изготовления матричной части армированных и монометалли-

ческих бил не отвечает в полной мере предъявляемым к ней требованиям как к материалу основы. А именно, при достаточной ударной вязкости сталь 35Л имеет низкую твердость и износостойкость. Для завершения комплекса работ по созданию конструкции и технологии литых армированных бил важно было вместо стали 35Л подобрать экономнолегированную сталь, лишенную указанных выше недостатков. С этой целью методом планирования эксперимента получены уравнения регрессии, выражающие влияние содержания углерода x_1 в интервале 0,6...1,0 %; хрома x_2 - 0,28...3,0 %; кремния x_3 - 0,38...0,8 %, температуры отпуска 400...650 °С на твердость Y_1 и ударную вязкость Y_2 стали, содержащей также 0,85...0,9 % марганца и 0,002 % бора:

$$Y_1 = 299 + 39,8x_1 + 18,1x_2 + 18,2x_3 - 0,14x_4 ;$$

$$Y_2 = 0,52 - 0,35x_1 - 0,36x_2 - 0,06x_3.$$

На базе уравнений регрессии разработана вычислительная программа на алгоритмическом языке "Бейсик", которая позволяет выбрать состав и температуру отпуска сталей, проявляющих при заданной ударной вязкости наибольшую твердость. Определены составы и температуры отпуска экономнолегированных сталей для основы бил, имеющих твердость не ниже 250 НВ при сохранении ударной вязкости не менее 0,35 МДж/м². Составы и температуры отпуска сталей, обладающих наибольшей твердостью и износостойкостью при соответствующей ударной вязкости представлены в табл.3.

Таблица 3

Состав и температура отпуска сталей

Углерод, % масс.	Хром, % масс.	Кремний, % масс.	$T_{отп}$, °С	Ударная вяз- кость, МДж/м
0,6	0,96	0,38	650	0,45
0,6	2,32	0,38	650	0,40
0,6	2,32	0,38	500	0,35

Производственные испытания и внедрение работы

На заключительном этапе работы важно было в производственных условиях с учетом полученных результатов изготовить отливки бил, испытать на промышленных мельницах и оценить их эксплуатационные свойства. Первоначально это было сделано для бил массой 7 кг, эксплуатируемых в мельницах с диаметром ротора 1,5 м. Конструктивно они соответствовали а.с. СССР № 1184560. Вставки для таких бил отливали из чугуна ЧХЗГЗ в кокиль. В качестве матричной использовали сталь 35Л. Отливки бил имели высокую трещиностойкость по сроку службы не уступали наплавленным, а по надежности превосходили их. Данная технология изготовления бил массой 7 кг была внедрена в производство с экономическим эффектом 71,5 тыс. руб. в год.

При изготовлении бил массой 15 кг в качестве матричной использовали сталь состава, % масс.: углерод - 0,45...0,60; кремний - 0,3...0,6; марганец - 0,7...0,8; бор - 0,002...0,003, хром - 0,6...1,0. Вставки из чугуна ЧХГ2ГБ отливали по а.с. № 1435390. Для получения пригарного покрытия использовали смесь состава, % масс.: ферромарганец ФМп 75 зерновой состав 0,1...1,0 мм - 65; алюминий зерновой состав 0,1...1,0 мм - 30; жидкое стекло ($\rho = 1400 \text{ кг/м}^3$, $M = 3$) - 5. Билы термообработывали по режиму закалки с отпуском на 500 °С. Испытания показали, что прослойки пригарного типа повышают трещиностойкость, уменьшают выкрашивание вставок при эксплуатации бил. Их служебные свойства превышают служебные свойства наплавленных бил, а себестоимость изготовления на 30...35% ниже. В настоящее время ведется освоение технологии изготовления таких бил в массовом производстве. Ожидаемый экономический эффект около 100 тыс. руб.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Изучено влияние поверхностных нагрузок на характер износа бил. Построена эпюра поверхностных нагрузок на биле, с помощью которой обоснованы конструктивные особенности отливок, работающих в условиях ударно-абразивного изнашивания. Показано, что с точки зрения противодействия поверхностным эксплуатационным нагрузкам наиболее эффективна трехслойная конструкция лопасти билы, в которой лобовой и тыльный слои выполнены из вязкого прочного сплава, например, стали, а сердцевинный - из твердого абразивно-износостойкого, например, из хромистого чугуна.

2. Разработана методика, определены параметры и эпюра объемных нагрузок на била. Показано, что при эксплуатации отечественных мельниц с диаметром ротора 1550...1660 и 2000...2600 мм максимальная величина штатной силы удара P составляет соответственно 50...60 кН и 118...120 кН, а продолжительность удара - $7,5 \cdot 10^{-3}$ с и $9,6 \cdot 10^{-3}$ с.

С помощью полученных данных разработана равнопрочная по длине конструкция била с коэффициентом запаса прочности по σ_T до 1,3 в зависимости от условий их эксплуатации. Матричная часть лопасти такого била должна иметь коробчатую форму в поперечном сечении и быть усилена продольными ребрами, сердцевинная часть выполняется вставкой клиновидной формы, ориентированной вершиной в сторону проушины. Показано, что била такой конструкции наиболее рационально изготавливать методом композиционного литья.

3. Изучено влияние степени армирования на прочность связи вставки из хромистого чугуна со стальной матрицей. Установлено, что технически значимая металлическая связь в отливках массой до 15 кг имеет место при степени армирования не выше 7...8 %.

Промежуточные покрытия на основе металлических порошков не позволяют повысить прочность металлической связи и степень армирования, при которой эта связь сохраняется, а наоборот нарушают ее даже при малых степенях армирования.

Показано, что при степени армирования более 30 % закрепление вставки в лопасти бил возможно только механическим путем.

4. Методом планирования эксперимента получены уравнения регрессии, описывающие влияние степени армирования x_1 , уклона армирующей вставки x_2 , толщины промежуточного покрытия x_3 , поперечного габарита отливки x_4 на пораженность трещинами отливок Y_1 и прочность механической связи их частей Y_2 :

$$Y_1 = 0,382 + 0,058x_1 - 0,105x_2 - 0,09x_3 + 0,085x_4;$$

$$Y_2 = 1573 - 91x_1 - 33x_2 + 82x_3 + 260x_4.$$

С помощью уравнений определены пути повышения механической связи матрицы со вставкой при обеспечении высокой трещиностойчивости отливок.

Установлено, что наиболее рациональными с точки зрения надежности закрепления в лопасти била являются вставки клиновидной

формы с коническими и пирамидальными выступами. Конструкция бил со вставками такой формы защищена авторскими свидетельствами СССР № I037948 и II84560.

5. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что для повышения служебных свойств покрытия на поверхности вставки должно включать дисперсный легкоплавкий компонент (алюминий) 25...55%, дисперсный тугоплавкий компонент (железо, ферромарганец) 40...70%, неорганическое связующее (жидкое стекло) 3...5%.

При этом покрытие указанного состава должно проявлять податливость по механизму скольжения частиц в пустоты, а после остывания отливок обеспечивать высокие трещиностойчивость и прочность механической связи.

Разработан и защищен авторским свидетельством СССР № I435390 новый способ получения армирующих вставок с покрытием пригарной природы.

6. Экспериментально, путем сравнения дефектности отливок, установлено, что наилучший технологический вариант для условий массового производства бил, армированных вставками, характеризуется положением отливки била на ребро, вертикальным положением вставки, подводом расплава стали питателями по разьему в торцовую грань лопасти в промежуток между стенкой формы и вставкой непосредственно в армированный узел.

7. Методом планирования эксперимента и с помощью компьютерной программы получен пакет составов экономнолегированных сталей которые при заданной ударной вязкости обеспечивают высокие эксплуатационные свойства отливок. Так наибольшей твердостью при ударной вязкости $0,45 \text{ МДж/м}^2$; $0,4 \text{ МДж/м}^2$; $0,35 \text{ МДж/м}^2$ обладают соответственно стали состава (% масс.) с температурой отпуска: углерод - 0,6; хром - 0,96; кремний - 0,38; $T_{\text{отп}} = 650 \text{ }^\circ\text{C}$;
углерод - 0,6; хром - 2,32; кремний - 0,38; $T_{\text{отп}} = 650 \text{ }^\circ\text{C}$;
углерод - 0,6; хром - 2,32; кремний - 0,38; $T_{\text{отп}} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$.

Во всех составах содержание бора составляет 0,002 %, марганца 0,8...0,9 %.

8. Внедрение в производство и эксплуатацию литых армированных бил разработанной конструкции, подтвердили результаты выполненных исследований. Экономический эффект только на одном предприятии Челябинерго составил 71,5 тыс. рублей.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Биметаллические литые била молотковых мельниц / Б.Э.Клецкин, Н.А.Ласьков // Механизация и повышение эффективности технологических процессов производства отливок металлургического оборудования: Тезисы докладов. - Днепропетровск, 1982. - С.25.
2. Литое биметаллическое било / Н.А.Ласьков, Б.Э.Клецкин, В.К.Кирсанов и др. // Информационный листок. - № 82-55. Челябинск: ЦНТИ, 1982. - С.4.
3. А.с. 1037948 СССР, МКИ В 02 С 13/28. Било для молотковой мельницы / Н.А.Ласьков, В.В.Павленко, П.В.Черногородов и др. (СССР) // Открытия. Изобретения. - 1982. - № 32.
4. Метод определения степени поражения трещинами отливок / Ласьков Н.А. // Вопросы теории и технологии литейных процессов. Сб. трудов. - Челябинск, 1983. - С.78-82.
5. Повышение служебных свойств бил молотковых мельниц / Н.А.Ласьков, Б.Э.Клецкин, В.М.Александров // Современные методы производства отливок, способствующие экономии материалов и топливно-энергетических ресурсов: Тезисы докладов. - Пермь, 1984. - С.45-46.
6. Влияние армирующей вставки на дефектность и служебные свойства бил / Н.А.Ласьков, Б.Э.Клецкин, В.К.Кирсанов // Новые материало- и трудосберегающие технологические процессы в литейном производстве: Тезисы докладов. - Челябинск, 1984. - С.24-25.
7. Эффективность армирования литыми вставками из износостойкого чугуна стальных бил молотковых мельниц / Н.А.Ласьков, В.М.Александров, Б.Э.Клецкин // Уральская научно-техническая конференция литейщиков: Тезисы докладов. - Челябинск, 1984. - С.16-17.
8. Использование чугуна в конструкции бил молотковых мельниц / Н.А.Ласьков, В.К.Кирсанов, В.М.Александров и др. // Улучшение качества металла и его экономия в литейном производстве за счет применения новых модификаторов для серого и высокопрочного чугуна. - Челябинск, 1984. - С.25-26.
9. Совершенствование бил молотковых мельниц / Б.А.Ласьков, В.М.Александров, Б.Э.Клецкин и др. // В кн.: Теория и технология литейных процессов. - Чебоксары, 1984. - С.91-94.
10. А.с. 1184560 СССР, МКИ В 02 С 13/28. Било для молотковой мельницы / Н.А.Ласьков, Б.Э.Клецкин, В.М.Александров и др. (СССР) // Открытия. Изобретения. - 1985. - № 33.

11. Александров В.М., Ласьков Н.А., Клецкин Б.Э. и др. Повышение износостойкости литых била быстроходных мельниц // Литейное производство, 1985. - № 7. - С.6-8.

12. Повышение ресурса работы била молотковых мельниц / А.М.Кляшницкий, Н.А.Ласьков // Участие молодых ученых и специалистов в реконструкции и модернизации предприятий, во внедрении новой техники и технологии. - Челябинск, 1986. - С.36-37.

13. А.с. 1435390 СССР, МКИ В 22 13/06. Способ изготовления армирующей пластины из твердого сплава / В.М.Александров, Н.А.Ласьков, Б.Э.Клецкин и др. (СССР) // Открытия. Изобретения. - 1988. - № 41.

14. Положительное решение ГИТЭИ на выдачу а.с. и формула изобретения по заявке № 4631245/31-33/002359 от 29.09.89 СССР, МКИ В 02 С 13/28. Било для молотковой мельницы / Н.А.Ласьков, Б.Э.Клецкин, В.М.Александров, Е.А.Шадрин (СССР) // М., ВНИИТЭ, 1989.
- 3 с.