

## **Краткое изложение содержания работы**

На сегодняшний день российские металлургические предприятия производят до 14 марок броневых сталей. Большинство из них разработаны более 30 – 50 лет назад. Современные разработки практически отсутствуют. За период с 2010 года были разработаны всего две марки броневой стали (А3 и 44С-Св-Ш). Существующие отечественные стали отличаются от импортных аналогов более высокой себестоимостью, относительно низкой технологичностью (неплоскостность, плохая свариваемость и, как следствие, низкая прочность сварного соединения, снижающая баллистическую стойкость участка сварного шва, недостаточная формуемость). Прямым следствием этого является невозможность обеспечения массовых характеристик создаваемых образцов ВВСТ сухопутной составляющей сил общего назначения с учетом роста требований по их защищенности, массе, подвижности, плавучести, а также проходимости по дорогам с различным покрытием и пр. При создании военной автомобильной техники до недавнего времени конструкторы ориентировались и применяли импортные высокопрочные стали семейства Arмох: Arмох 500Т, Arмох 600Т, Arмох Advance (SSAB, Швеция) и т.п. в силу отсутствия отечественных аналогов, сопоставимых по стоимости и, самое главное, качеству.

Таким образом, проблема производства новой противопульной свариваемой брони является актуальной задачей.

Для разработки прогрессивных металлургических технологий производства броневой стали нового поколения, направленных на достижение поставленной цели – прорывного повышения уровня и стабильности служебных свойств, снижения отсортировки, авторскому коллективу исследователей необходимо было решить на принципиально новом уровне ряд взаимосвязанных задач:

- разработка требований и создание современных научных подходов к разработке броневых сталей нового поколения и сквозной промышленной технологии их производства (от выплавки, прокатки до окончательной термической обработки – закалки и низкотемпературного отпуска) и переработки;

- проведение теоретических и экспериментальных исследований закономерностей процессов формирования структуры и свойств броневых сталей, в том числе при различном содержании легирующих элементов;

- разработка способов управления структурообразованием броневых сталей на всех этапах технологического передела для обеспечения наиболее высокого комплекса служебных свойств, эксплуатационной надежности изготавливаемых деталей и узлов образцов ВВСТ;

- освоение крупномасштабного производства и внедрения броневых сталей в автомобилестроительной отрасли специального назначения.

В связи с этим была проведена сравнительная оценка требований к броневым сталям отечественных и зарубежных стандартов, в том числе теоретические исследования способов обеспечения требуемых технических характеристик разрабатываемой стали специального назначения и возможные технологические маршруты для освоения промышленного производства. Были разработаны требования к химическому, фазовому составам, структурному состоянию, типу и параметрам выделений избыточных фаз для обеспечения комплекса свойств разрабатываемой броневой стали.

На основании разработанных требований были выплавлены экспериментальные образцы стали специального назначения 13 различных химических составов, отличающихся по содержанию углерода и легирующих элементов, а также системой микролегирования. Проведены всесторонние исследовательские испытания экспериментальных образцов, включающие физическое моделирование процессов горячей деформации на многофункциональном комплексе Gleeble 3500 для определения параметров горячей прокатки и исследование влияния высокотемпературного деформирования на процессы упрочнения и разупрочнения стали. Полученные результаты явились основой для разработки температурных и энерго-силовых параметров последующей лабораторной прокатки заготовок на заданную толщину по различным режимам и термической обработки образцов проката.

Проведенные комплексные механические испытания и металлографические исследования экспериментальных образцов, в том числе с использованием современных методов исследования, позволили сформулировать основные требования к химическому составу и параметрам сквозной технологии применительно к условиям ПАО «ММК», а также разработать и утвердить технологическую документацию для выпуска опытно-промышленной партии новой броневой стали марки СМ1.

На промышленной площадке ПАО «ММК» были изготовлены партии проката толщиной 6,0 и 8,0 мм и проведены их предварительные испытания в соответствии с программой и методикой, включающие механические испытания готовой продукции на растяжение, твердость, ударный изгиб (ударную вязкость), статический изгиб, комплексные металлографические исследования, испытания образцов проката на противоположную стойкость. Сравнение результатов испытаний стали марки СМ1 показало ее значительное превосходство над существующими как российскими, так и зарубежными аналогами. Установлено, что в сопоставимых толщинах сталь СМ1 может повысить класс защищенности специальных автомобилей, либо, при сохранении класса защиты, позволяет уменьшить толщину применяемого материала, что снижает массу всего изделия на 15 – 20 %. Дополнительно были проведены исследования свариваемости стали марки СМ1 на образцах, отобранных от изготавливаемой военной техники, как на основе специально разработанного метода моделирования термических циклов сварки и изучения кинетики распада аустенита, так и исследованиях механических свойств зоны термического влияния и сварного соединения в целом. Разработанная технология сварки новой броневой стали была успешно внедрена в АО «Ремдизель».

Новая броневая сталь марки СМ1 толщиной 8 мм была испытана в составе комбинированной защиты кузова автомобиля специального назначения. Проведенные испытания показали положительные результаты и превосходство по всем характеристикам над применяемой в настоящее время в конструкции сталью 7, что подтверждено соответствующими протоколами.

Проведенные баллистические испытания новой броневой стали СМ-1 толщиной 6 мм в составе кабины автомобиля «КАМАЗ2 также показали положительные результаты на противоположную стойкость и превосходство в сравнении со сталью А3.

Таким образом, в процессе работы были освоены и внедрены следующие современные технологии, не имеющие мировых аналогов:

- технология выплавки и разлива стали;
- технология прокатки стали марки СМ1 на современном широкополосном стане горячей прокатки «2500» после модернизации;
- технология термической обработки на современном оборудовании.

Решение такого комплекса задач стало возможным только благодаря плодотворному сотрудничеству специалистов ключевых предприятий металлургической отрасли – ПАО «ММК», автомобилестроительной отрасли – АО «Ремдизель» и ПАО «КАМАЗ» и науки – ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина».

### **Основная научно-техническая идея и практические достижения.**

На современном этапе развития материаловедения броневых сталей наиболее важная роль в достижении необходимого фазового состава и структурного состояния металла, а следовательно, комплекса эксплуатационных свойств, отводится выделениям избыточных фаз, формирование которых должно происходить в строго установленных условиях на определенных этапах производства проката.

Воздействие на формирование структуры и свойств броневых сталей частиц избыточных фаз усиливается с уменьшением их размеров, особенно при переходе в наноразмерную область. Таким образом, создание условий для формирования определенного типа, количества и размеров частиц избыточных фаз является важнейшим инструментом, позволяющим добиться прорывного повышения показателей механических и других служебных характеристик броневых сталей.

Использование комплексного подхода к анализу фазовых превращений, а также к условиям выделения и растворения частиц избыточных фаз, влияющих на формирование структуры и потребительских свойств, позволило для стали конкретного химического состава определять условия выделения и растворения частиц, их влияние на свойства и назначать технологические параметры производства, обеспечивающие необходимый уровень и стабильность комплекса свойств в заданном узком диапазоне.

Созданная научная база и выполненный большой объем прикладных исследований позволили создать и внедрить на Магнитогорском металлургическом комбинате передовые технологии производства нового поколения броневых сталей со стабильно высокими показателями служебных свойств и низким уровнем отсортировки. Среди них наиболее значимой является разработка новой стали специального назначения СМ1 для получения листа толщиной 6,0 и 8,0 мм.

Применение данной разработки в объектах военной специальной техники позволило решить важнейшую социально-экономическую задачу – повысить класс защиты, надежность и снизить весовые характеристики образцов военной техники, обеспечивая защиту личного состава в условиях проводимой специальной военной операции.

### **Краткая оценка новизны, отличающая данную работу**

На базе новейших достижений металлургии и материаловедения разработаны и использованы для освоения броневых сталей нового поколения и технологий их производства оригинальные наукоемкие подходы, основой которых является получение необходимого структурного состояния и комплекса свойств путем управления формированием выделений избыточных фаз, формирование которых должно происходить в строго установленных условиях на определенных этапах технологии производства проката.

Разработан комплексный фундаментальный подход к анализу фазовых превращений, а также к условиям выделения и растворения частиц избыточных фаз, влияющих на формирование структуры и потребительских свойств, включающий

проведение термодинамического, физико-химического анализа условий растворения и выделения частиц неметаллических избыточных фаз, электронномикроскопические исследования их типа, морфологии и размеров. Использование такого подхода позволило для стали конкретного химического состава определять условия выделения и растворения частиц, их влияние на свойства и назначить технологические параметры производства, обеспечивающие необходимый уровень и стабильность комплекса свойств в заданном узком диапазоне.

Установлено, что изменение температуры нагрева новой броневой стали под закалку не оказывает существенного влияния на твердость стали в отличие от скорости охлаждения. Увеличение скорости охлаждения от 10 до 100 °C/с обеспечило повышение твердости стали в среднем на 40 HBW. Полученные результаты представляют помимо практического значения еще и научный интерес и могут являться основой при выборе температурно-деформационных параметров обработки высокопрочных сталей, причем не только специального назначения.

По результатам изучения процессов упрочнения и разупрочнения при высокотемпературном деформировании установлено, что обусловленные рекристаллизацией процессы активно протекают при температурах более 920 °C, причем такой вывод справедлив для составов как с микролегирующими добавками, так и без добавок. В связи с этим наиболее благоприятным температурным интервалом деформации является следующий: начало деформации при 1050 – 1080 °C, окончание деформации при 880 – 900 °C.

Разработаны требования к химическому составу броневых сталей нового поколения, обеспечивающие сбалансированность по количеству углерода и карбидообразующих элементов, в результате которой карбиды равномерно распределяются по зерну, и склонность стали к хрупкому разрушению значительно понижается.

Разработаны режимы температурно-деформационной обработки, обеспечивающие баллистическую стойкость броневой стали путем увеличения

деформационного упрочнения, а также снижения термического разупрочнения. Требуемые значения указанных параметров достигаются за счет:

- уменьшения размера зерна аустенита: чем меньше размер зерна, тем больше время запаздывания текучести и больше деформационное упрочнение;

- наличия двойникованной субструктуры: чем мельче размер зерна аустенита, тем меньше вклад двойникования в деформации. В сталях, содержащих большое количество двойников и имеющих значительный размер зерна, запаздывания текучести не происходит и деформационное упрочнение ниже;

- наличия твердых структурных составляющих (например, карбидов), на которых локализация деформации происходит в первую очередь.

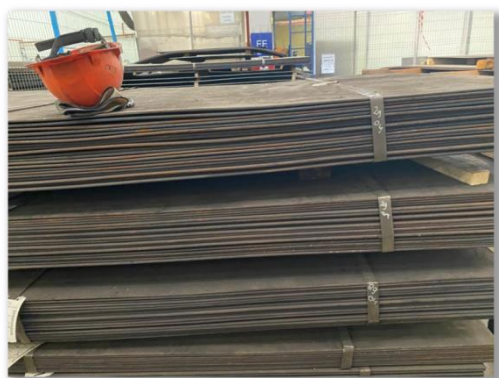
### **Сравнение с существующими отечественными и зарубежными аналогами.**

В таблице ниже приведены сравнительные характеристики отдельных существующих броневых сталей и новой стали марки СМ1 сопоставимых толщин.

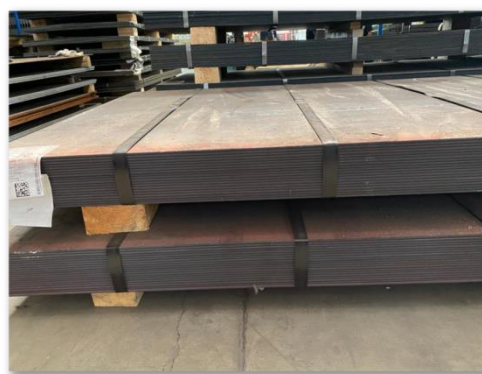
| <b>Марка стали</b>                            | <b>Год разработки нормативного документа</b> | <b>Твердость, НВW</b> | <b>Предел прочности, МПа</b> |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| Сталь 1                                       | 1990                                         | 514-444               | 1400-1700                    |
| Сталь 7                                       | 1994                                         | 388-495               | 1200-1600                    |
| А3                                            | 2012                                         | 495-578               | 1600-1800                    |
| Армох 600 (Швеция)<br>Лучший импортный аналог | 2010                                         | 570-640               | >2000                        |
| <b>СМ1</b><br><b>Новая разработка</b>         | <b>2022</b>                                  | <b>610-650</b>        | <b>&gt;2100</b>              |

Помимо улучшенных механических характеристик и пулестойкости, разработанная сталь характеризуется еще одним важным технологическим параметром, значительно превосходящим существующие российские аналоги и некоторые зарубежные, а именно плоскостностью готового термообработанного проката, достигаемой специально разработанной технологией закалки. Данный параметр является крайне важным фактором в процессе изготовления элементов защиты и деталей корпуса автомобилей, т.к. необходимо обеспечивать

плоскостность деталей после лазерной вырезки для дальнейшего использования. По результатам переработки более 3200 тонн новой броневой стали марки СМ1 производителями специальной техники подтверждено не только полное соответствие стали заявленным механическим характеристикам и пулестойкости, но и высокое качество листового проката, что позволяет значительно упростить технологический процесс переработки материала и последующей сборки готовых машин. На рисунке показано качество листов в состоянии поставки для существующей стали 7 и разработанной стали СМ1.



а)



б)

Качество листов в состоянии поставки: а – сталь 7 б – сталь СМ1

### **Достигнутый экономический и (или) социальный эффект от внедрения**

Экономическая эффективность разработок коллектива ученых складывается из многих показателей, имеющих место как в сфере производства высококачественной броневой стали по созданным технологиям мирового уровня, так и в сфере ее переработки у предприятий специального автомобилестроения и последующего использования.

Выполнение работы позволило ПАО «ММК» получить экономический эффект, увеличить доход от производства и реализации нового поколения броневых сталей (выручка составила более 571 млн руб.), повысить научно-технический уровень производства и решить задачу технологического суверенитета России в области поставок броневых сталей.

Применение данной разработки в объектах военной специальной техники позволило, как было показано выше, решить и важнейшую социальную задачу – повысить класс защиты, надежность и снизить весовые характеристики образцов



военной техники, обеспечивая защиту личного состава в условиях проводимой СВО. Применение новой броневой стали марки СМ1 в АО «Ремдизель» позволило значительно увеличить производительность выпуска специальных автомобилей для нужд СВО за счет снижения трудоемкости при проведении заготовительных и сборочно-сварочных работ, тем самым достигнув не только значительного экономического эффекта (возможность ПАО «КАМАЗ» уже к 2023 году изготовить 1250 кабин), но, что более важно, неопределимого социального эффекта.

Дополнительный экономический эффект от использования разработанных броневых сталей с повышенными показателями механических и других служебных характеристик реализуется, в частности, за счет следующих составляющих:

- энерго- и ресурсосбережения (не менее чем на 12 – 15%) при изготовлении специальных автотранспортных средств за счет перехода к конвейерному типу сборки машин с применением новой броневой стали марки СМ1;

- расширения сортамента и улучшения качества производимых броневых сталей нового поколения благодаря оригинальной технологии производства на новейшем и модернизированном оборудовании прокатных станов и участков термического отделения;

- снижения массы специальных автотранспортных средств не менее чем на 15 – 20 % за счет применения броневых сталей меньшей толщины при сохранении специальных характеристик;

- снижения расхода топлива при эксплуатации специальных автотранспортных средств;

- улучшения экологической обстановки.

Таким образом, от внедрения разработанных коллективом ученых оригинальных наукоемких технологий получен большой социально-экономический эффект как при производстве в ПАО «ММК», так и при последующей переработке и использовании броневых сталей нового поколения в условиях АО «Ремдизель». Как следует из представленных сведений, его общая величина превосходит 571 млн рублей.