

УДК 621.833.6

П.Л. Мариев, В.И. Моисеенко, А.Н. Егоров, В.М. Гацуро, Д.И. Харитончик

КОНЦЕПЦИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ БелАЗ ПУТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЧНОСТЬЮ И НАДЕЖНОСТЬЮ ИХ КОНСТРУКЦИЙ

*ПО «БелАЗ» - Белорусский автомобильный завод
Жодино, Беларусь*

*Институт механики и надежности машин НАН Беларуси
Минск, Беларусь*

В современную эпоху дальнейший рост благосостояния мирового сообщества немислим без постоянного увеличения рынка сырьевых ресурсов: энергетических, химических и металлических материалов. На этом фоне рынок горной и карьерной техники является динамично развивающимся с жесткой конкуренцией продукции, выпускаемой индустриально развитыми странами.

В условиях свободного обмена информацией о конструкциях машин и равных возможностях в комплектации покупными изделиями выпускаемой продукции определяющим параметром конкурентоспособности карьерных самосвалов является себестоимость единицы транспортных услуг — себестоимость 1 т км перевозок груза. Этот показатель снижается с ростом грузоподъемности, чем и обусловлен в последние годы непрекращающийся рост грузоподъемности вновь проектируемых самосвалов для строящихся карьеров по мере создания шин необходимой грузоподъемности (рис. 1). Начиная с 60-х годов, максимальная грузоподъемность серийно выпускаемых самосвалов БелАЗ увеличилась почти в 8 раз: с 27 тонн до 220 тонн. В завершающей стадии находится разработка самосвала грузоподъемностью 320 тонн. Вместе с тем, для действующих карьеров со сложившейся структурой дорог и погрузочного оборудования, эффективными оказываются и самосвалы меньшей грузоподъемности — 45-55 тонн. В настоящее время наибольшим спросом, особенно на рынке России, пользуются самосвалы грузоподъемностью 55, 130 и 220 тонн. Развивающиеся мировые тенденции увеличения конкурентоспособности горной техники за счет комплектной ее поставки в карьеры и регионы привели к освоению в производстве целого ряда погрузчиков. Производятся в объединении и другие типы специального технологического транспорта: аэродромные тягачи, шлаковозы для металлургии, другие средства для транспортирования тяжеловесных грузов. Но основной продукцией ПО «БелАЗ» остаются карьерные самосвалы (рис. 2).

При использовании однотипных карьерных самосвалов в сопоставимых условиях эксплуатации решающее значение в формировании себестоимости транспортировки приобретают такие показатели самосвала, как производительность, затраты на эксплуатацию и ремонт, начальная стоимость и общий срок эксплуатации. Более детальный анализ свидетельствует, что при одинаковых конструкторско-технологических возможностях самосвала его безотказная работа и наименьшая его масса способны обеспечить максимальную производительность при минимальных затратах на эксплуатацию и ремонт [1].

Сегодня очевидно, что увеличить напряженность деталей и тем самым снизить металлоемкость конструкции возможно лишь за счет повышения равнонапряженности и равнопрочности конструктивных элементов.

Пути устранения концентрации напряжений в конструктивных элементах машин известны и достаточно успешно решаются при современных методах проектирования.

Более сложной является задача учета концентрации напряжений при оценках долговечности. Почти век назад Нейбером была установлена приоритетная роль степени локализации пластической деформации (ПД) на величину действительной концентрации напряжений в зоне резкого изменения формы [1]. Позже в отдельных исследованиях [2] отмечалось изменение величины концентрации напряжений от числа циклов действующих напряжений, что подтверждало наличие ПД в зоне концентратора и ее роль в изменении концентрации напряжений и несущей способности детали при циклическом нагружении. Однако обнаруженное явление практически не нашло отражение в научно обоснованных методах расчета и способах повышения равнопрочности материалов деталей и несущих конструкций.

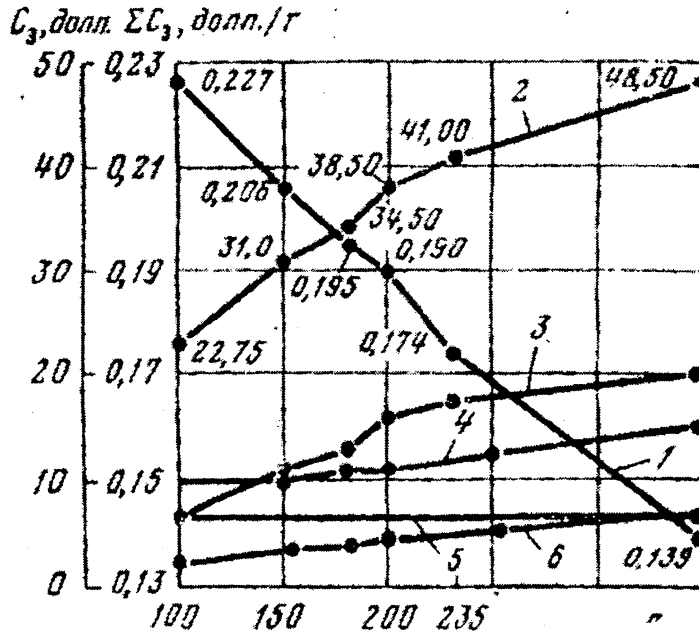


Рис.1. Часовые эксплуатационные расходы на транспортирование горной массы автосамосвалами особо большой грузоподъемности (емкость ковша экскаватора 11,4 м³): 1 – суммарные эксплуатационные расходы на 1 т грузоподъемности; 2 – суммарные эксплуатационные расходы; 3 – расходы на шины; 4 – расходы на ремонт; 5 – заработная плата; 6 – расходы на дизтопливо и смазочные материалы [1]



а)



б)

Рис. 2. Карьерные самосвалы грузоподъемностью: а) 27; б) 220 тонн.

Вместе с тем, сегодня не вызывает сомнения, что разрушение материала в конструкции определяется как величиной действующей нагрузки, так и процессами пластической деформации, в зоне действия которой происходит эволюция дислокационной структуры. Оба процесса всегда предшествуют любому разрушению

стали [3]. Чем в меньшем объеме сосредоточена ПД, определяющая перемещение несущих сечений деталей, тем больше ее абсолютная величина и тем быстрее происходит эволюция дислокационной структуры, приводящая к разрушению материала. Поэтому наибольший интерес представляет локализованная пластическая деформация (ЛПД) возникающая и распространяющаяся в зернограничных (приграничных) объемах зерен. Это, по современным представлениям, минимально возможные объемы, где может концентрироваться ПД, особенно если она развивается в сталях высокой прочности и твердости.

Установлено, что зарождение и движение дислокаций (а по сути — ЛПД) происходит в узлах сопряжений кристаллических решеток внутри зерна, отличающихся своими параметрами из-за системной концентрации в приграничных объемах зерен легирующих и примесных элементов (Ni, Mn, C, N, Mo, V и других), формирующейся при кристаллизации стали, а также при диффузионном насыщении материала на стадии ХТО [4].

Впервые показано (в том числе на наноуровне), что медь — главная и практически неудаляемая примесь стали — регулирует распределение в приграничных объемах зерен основных аустенитообразующих элементов: увеличивает концентрацию никеля и марганца, и снижает концентрацию и диффузию углерода и азота (рис.3, таблица 1).

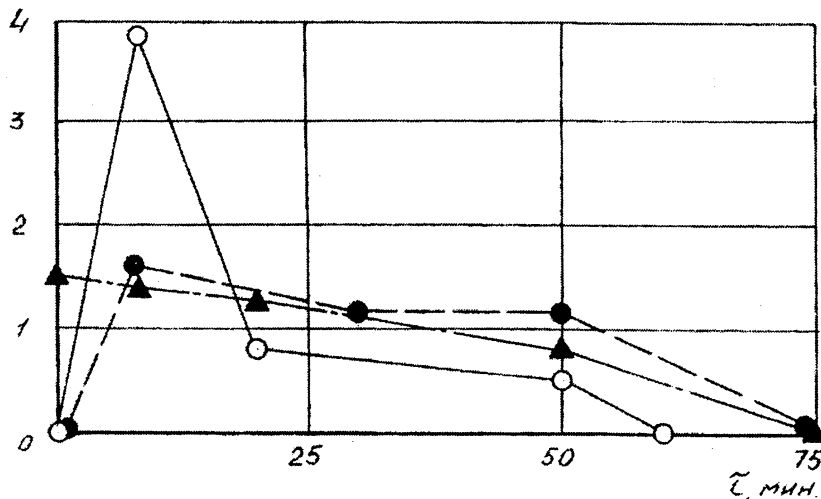


Рис. 3 Распределение Cu \circ , Ni \bullet и Mn \blacktriangle в зоне фасетки хрупкого излома стали 14X2ГМР после отжига. Auger-спектроскопия. Скорость ионного травления: $V=0,5$ нм в мин (до 30 мин травления); $V=3$ нм в мин. (после 30 мин травления). Излом в вакууме. Среднее содержание: Cu = 0,15%; Ni = 0,12%; Mn = 0,40%

Таблица 1

Локальная концентрация (интенсивность излучения I) углерода и меди на свободной поверхности излома в вакууме $1 \cdot 10^{-9}$ при нагреве 25-600°C (Sims-спектроскопия)

Марка стали	Изменение интенсивности излучения элементов (I_{600}/I_{25})	
	C	Cu
Сталь 20	44	3
14X2ГМР	21	11
14ГНМДАФБРТ	8	17

Это принципиально новая трактовка природы прочности и разрушения позволила реализовать ряд мероприятий по увеличению несущей способности и надежности основных крупногабаритных деталей и узлов собственного изготовления. Практическую значимость представляет формирование структурной и механической однородности в зубчатых колесах, упрочняемых цементацией и азотированием, а также в крупных отливках, повсеместно заменяющих в тяжелом машиностроении поковки в несущих конструкциях, в том числе и в литосварных [4].

Известно, что размеры и вес зубчатых колес редукторов могут колебаться до 7 раз в зависимости от типа и качества термообработки [5]. Считается, что минимальный вес узла и максимальная его надежность могут быть достигнуты при правильно проведенной цементации. В результате такой обработки сопротивление усталости по всей глубине упрочненного слоя оказывается выше, чем действующее напряжение [6]. Эта задача решается за счет использования химически однородного состава заготовки и однородной среды цементационного агрегата.

Достичь поставленную цель не всегда удавалось на сталях обычной выплавки, особенно при недостаточно точном контроле атмосферы печи по ее углеродному потенциалу. Показано, в частности, что обычно разрушение цементированных зубчатых колес происходит по бейниту, образовавшемуся по границам мертенситных зерен [6]. Отмечено также разрушение азотированных слоев по межзеренным объемам и по нитридам алюминия, имеющих повышенную хрупкость, особенно при недостаточной прочности и твердости металла под упрочненным слоем.

Одновременно установлено, что наряду с химическим взаимодействием элементов в жидком металле и в зернограницных объемах затвердевающего и твердого металла важнейшее место в формировании неоднородности принадлежит процессам кристаллизации и ликвационным процессам при затвердевании стали. Поэтому закономерности первичной и вторичной кристаллизации, а также изобаро- и изотермические характеристики элементов, применяемых при раскислении и модифицировании литой стали, явились главными отправными точками в разработке путей и технологий управления и снижения химической, а следовательно, структурной и механической неоднородности материала крупногабаритных стальных отливок, используемых при изготовлении вышеуказанных деталей. Концептуально снижение всех видов неоднородности стали можно осуществить устранением в литой стали зоны крупных равноосных кристаллов, границы которых являются местами концентрации ликватов. В мелких равноосных и мелко столбчатых кристаллитах междендритная ликвация практически отсутствует. Подтверждением однородности образующейся при этой литой структуре служит возникновение в начальной стадии грануляции (δ -железа) границ аустенитных зерен по телу первичного зерна, а не по его границам, как это происходит в крупных равноосных зернах. Измельчение зерна литой стали в рассматриваемом случае достигается как за счет снижения локального времени кристаллизации, то есть времени нахождения металла в жидко-твердой фазе, так и созданием условий для образования возможно большего числа центров кристаллизации с одновременным торможением их роста [4]. Практически решение задачи осуществлено кристаллизацией отливки с заданными скоростями и температурными градиентами, а также модифицированием металла ванадием, кальцием, а также редкоземельными металлами (РЗМ).

Изложенная концепция и предложенные практические подходы нашли свое воплощение в разработке технической идеологии создания технологии и производства зубчатых колес из литой недеформированной заготовки, получаемой центробежным электрошлаковым литьем. Литая структура в этих заготовках имеет мелко столбчатую структуру. Расстояние между осями дендритов в зоне зубьев не более 0,5 мм. При

такой дисперсности концентрация меди в зернограничных объемах снижается и выравнивается, что повышает все характеристики цементированного слоя: глубину, градиенты твердости, сопротивление изгибной и контактной усталости, сопротивление короблению после закалки (рис. 4) [4]. Как показал более чем десятилетний опыт изготовления и эксплуатации зубчатых колес, переход на литые заготовки позволил увеличить надежность колес (рис. 5) и их долговечность до 10 раз. Сегодня это соответствует пробегу автомобилей не менее 600 тыс. км [1].

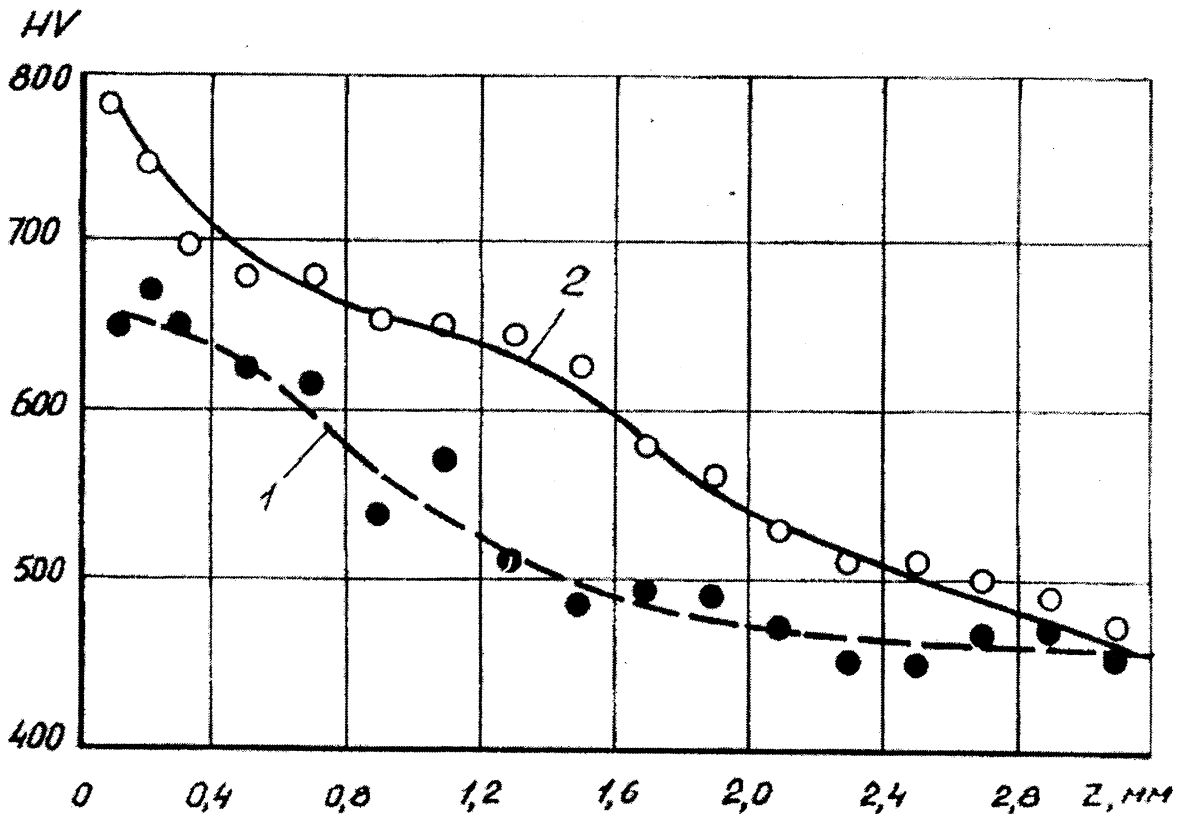


Рис. 4. Распределение микротвердости по толщине цементированных слоев зубьев, колес из ЦЭШЛ и проката; время цементации – 12ч.; ПТО – нормализация и высокий отпуск; прокат – 1; ЦЭШЛ – 2

Использование при литье специально созданных бескремниевых лигатур (БКЛ) на основе РЗМ и модифицирующих элементов позволило дополнительно диспергировать структуру и впервые получать высоконагруженные азотированные зубчатые колеса внутреннего зацепления из крупногабаритной (\varnothing 1000 мм) литой заготовки, получаемой центробежным литьем. При этом толщина снимаемого металла с внутренней поверхности невелика и приемлема для деталей такого типоразмера. Повышение чистоты границ зерен за счет введения в сталь лигатуры с РЗМ позволяет получать рабочие поверхности с характеристиками более высокими, чем это достигается в колесах, получаемых с использованием раскатных колец, для изготовления которых применяются традиционные слитки, подвергаемые прошивке (рис. 6). Для азотированных колес создана специальная сталь, у которой границы зерен упрочняются никельалюминиевыми соединениями. Благодаря этому возрастает твердость сердцевины зуба при азотировании до 40 HRC и азотированные колеса по своим свойствам могут рассматриваться как альтернатива цементированным, так как при ионном азотировании и применении РЗМ удастся увеличить глубину слоя до 0,7-

0,8 мм (рис. 6). При этом отпадает необходимость шлифования колес и почти в 3 раза снижаются энергозатраты на их производство. Опытно-промышленные образцы прошли стендовые испытания и работают в карьере. Следует добавить, что лигатуры с РЗМ резко повышают и свойства цементированных поверхностей (рис. 7, 8).

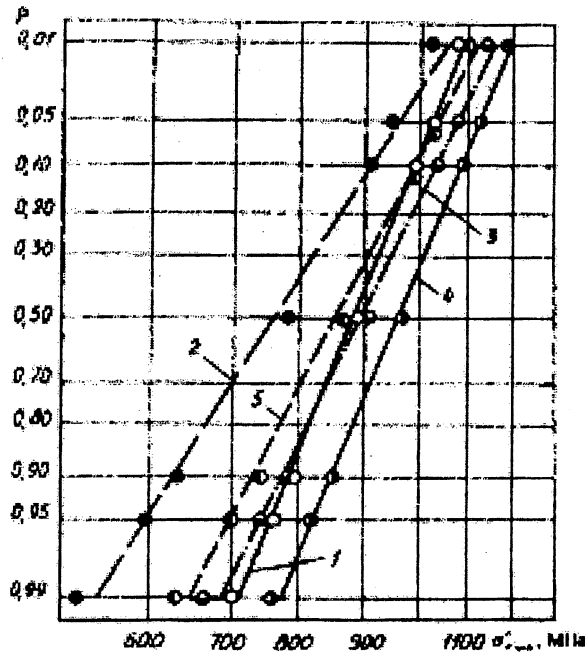
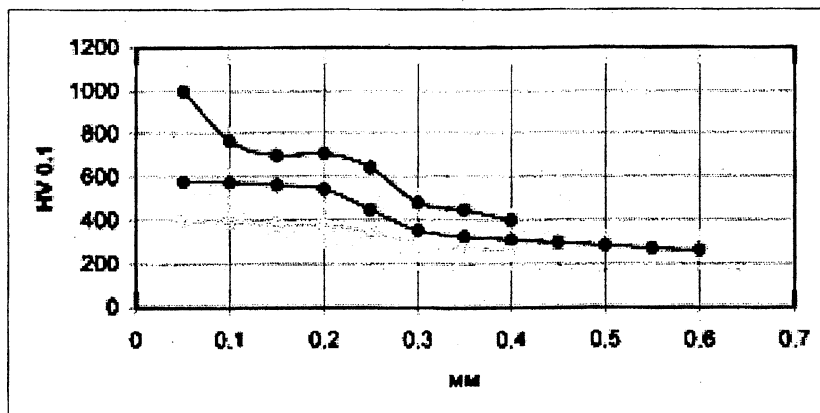


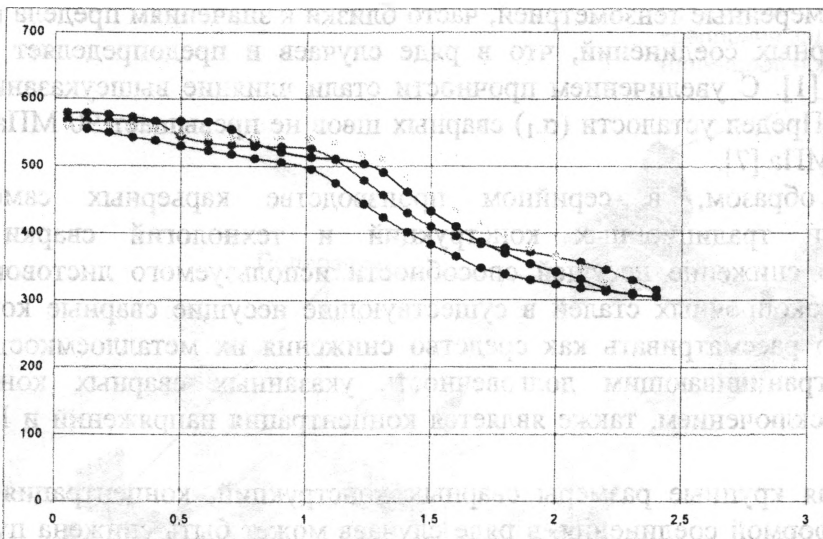
Рис. 5 Распределение пределов выносливости испытанных зубьев зубчатых колес: 1 – 20Х2Н4АШ; 2 – 20Х2Н4А; 3 – 20Х2Н4АШК; 4 – 20ХН3АШ; 5 – 20ХН3А

Все несущие системы карьерных самосвалов, равно как и большинство таких же систем других машин большой единичной мощности, являются сварными или литосварными. Рама карьерного самосвала до недавнего времени практически была цельносварной.



- — 20ХН4МФЮ. Твердость поверхности 950 HV₅. Твердость сердцевины 42 HRC.
- — 30ХНМ с БКЛ. Твердость поверхности 689-700 HV₅. Твердость сердцевины 255 HB.
- — 38ХН3МФА — серийная, раскатное кольцо из пролитого слитка. Твердость поверхности 566-575 HV₅. Твердость сердцевины 255 HB.

Рис. 6. Изменение микротвердости азотированных поверхностей крупногабаритных зубчатых колес



Сталь 20 Твердость поверхности: с БКЛ 61-62 HRC, без БКЛ 60 HRC.

Твердость сердцевины 30 HRC.

- — БКЛ №1;
- — БКЛ №2;
- БКЛ №3;
- — без БКЛ.

Рис. 7. Изменение микротвердости цементированных поверхностей при различном модифицировании сталей при выплавке

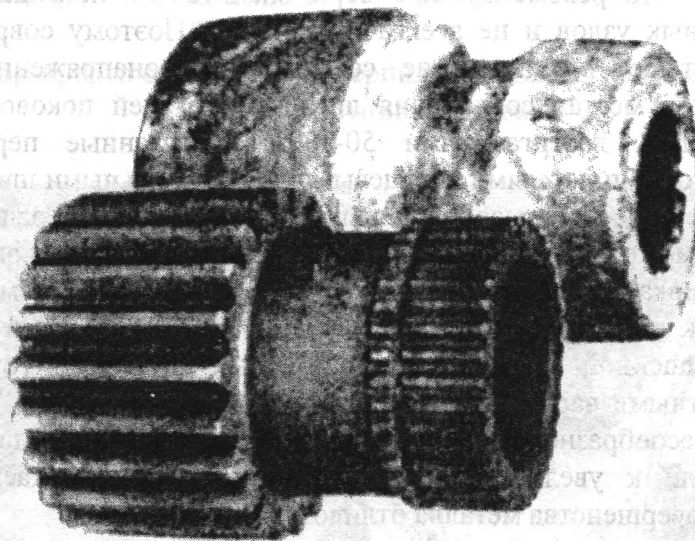


Рис. 8. Крупногабаритное зубчатое колесо из литой недеформированной заготовки (вверху — заготовка; внизу — колесо)

В сварных конструкциях массовая доля металла шва редко превышает 1%. В то же время 70-80% всех отказов конструкций связаны со сварными соединениями [7]. Наибольшую опасность представляют разрушения, вызванные усталостью и охрупчиванием металла. Проявлению указанных дефектов способствует, как уже упоминавшиеся факторы: концентрация напряжений, пластические деформации в зоне сварки, так и специфические: несплошность металла шва, увеличение размера зерна в околошовной зоне, остаточные напряжения. Местные действующие напряжения в раме

самосвала, измеренные тензометрией, часто близки к значениям предела выносливости образцов сварных соединений, что в ряде случаев и предопределяет поломки рам автомобилей [1]. С увеличением прочности стали влияние вышеуказанных факторов усиливается. Предел усталости (σ_{-1}) сварных швов не превышает 90 МПа для сталей с $\sigma_b \approx 900-1000$ МПа [7].

Таким образом, в серийном производстве карьерных самосвалов при использовании традиционных конструкций и технологий сварки происходит существенное снижение несущей способности используемого листового металла, а введение высокопрочных сталей в существующие несущие сварные конструкции не всегда можно рассматривать как средство снижения их металлоемкости. Основным фактором, ограничивающим долговечность указанных сварных конструкций, за небольшим исключением, также является концентрация напряжений и ПД в сварных швах.

Учитывая крупные размеры сварных конструкций, концентрация напряжений, вызываемая формой соединения, в ряде случаев может быть снижена путем создания плавных переходов на основной металл, а также применения различного рода скосов, выкружек, устранения неровностей. До недавнего времени плавность перехода к основному металлу чаще всего достигалась механической обработкой швов: абразивными кругами либо фрезами. При этом следы обработки обычно располагают вдоль действующих напряжений.

Пределы выносливости стыковых соединений после механической обработки и перекристаллизации швов скоростным нагревом резко возрастают и практически достигают уровней пределов выносливости основного материала. Долговечность сварных соединений после указанной обработки возрастает в 10-13 раз [1]. Следует, однако, учитывать, что рекомендуемые меры значительно повышают трудоемкость изготовления сварных узлов и не всегда приемлемы. Поэтому современные методы проектирования отдают предпочтение созданию равнонапряженных конструкций путем применения в местах соединения листовых деталей поволоков или отливок с радиусами переходов, достигающими 50-100 мм. Указанные переходные детали свариваются с листовыми деталями кольцевыми или продольными швами. В последние годы предпочтение отдается высокопрочным отливкам, концентрация напряжений в галтелях, которых может быть сведена к безопасным значениям. В значительной мере предпочтение отливкам обусловлено также и тем, что энергоемкость получения деталей из отливок ниже в 6-7 раз по сравнению с использованием проката. Опыт создания рам повышенной долговечности карьерных самосвалов грузоподъемностью выше 100 т известными зарубежными фирмами "Катерпиллер" и "Камацу" (рис. 9) подтверждает целесообразность устранения угловых сварных швов, хотя такие решения и привели к увеличению массы самосвалов, выпускаемых указанными фирмами из-за несовершенства металла отливок.

Техническая идея замены поковки отливкой в конструкциях самосвалов БелАЗ заключается в получении мелкодисперсной литой структуры металла, лишенной внутренних дефектов [1]. Параметры структуры (в первую очередь дисперсность дендритной структуры – ДДС – и ее плотность) достигаются применением ЭШЛ, внутренних и наружных макрохолодильников в обычном литье, а в последнее время — специальным составом стали, обеспечивающим повышенную равнопрочность границ зерен, мелкозернистость материала и, как следствие, повышение сопротивления ЛПД и разрушению. Сложными по форме тонкостенными стальными отливками сегодня заменяются крупные сварные узлы (весом 300-500 кг) (рис. 10).

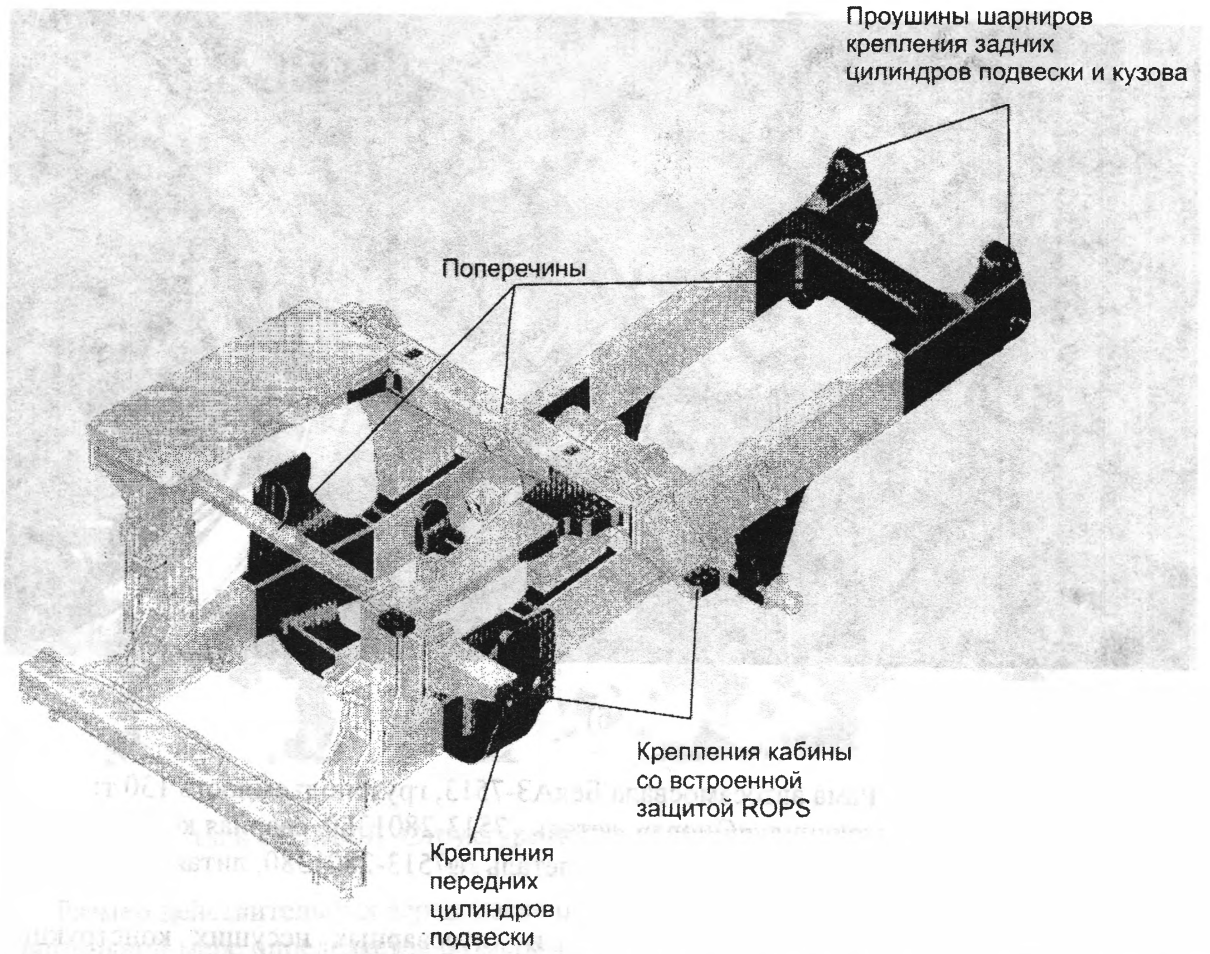
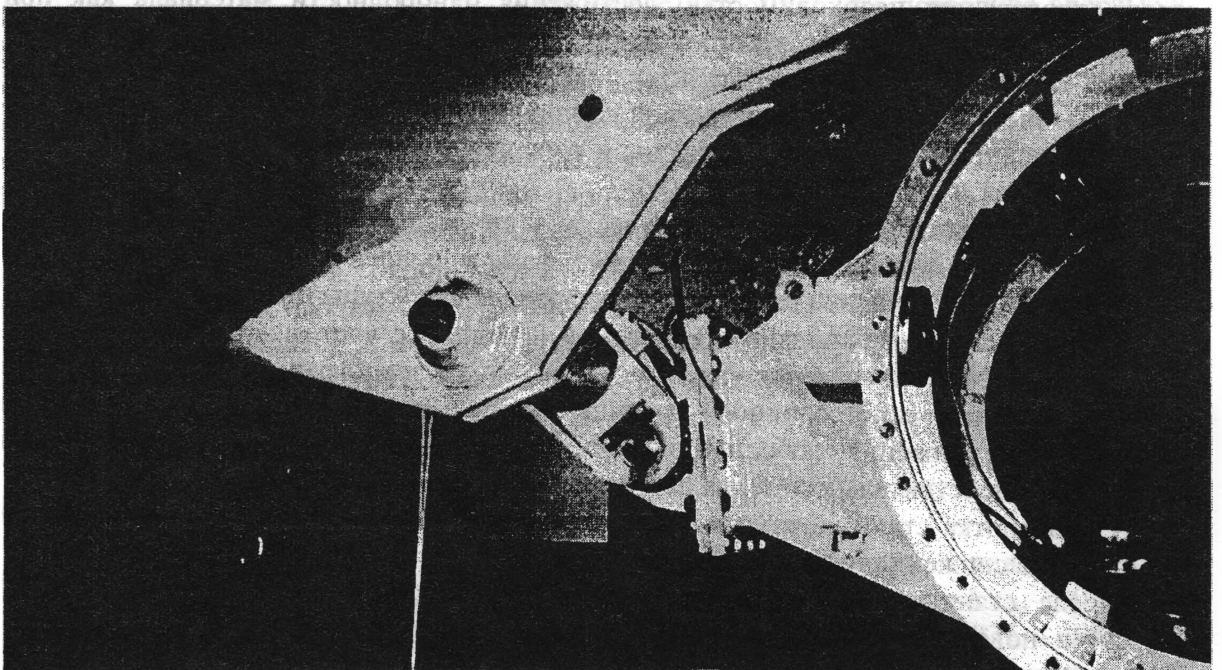
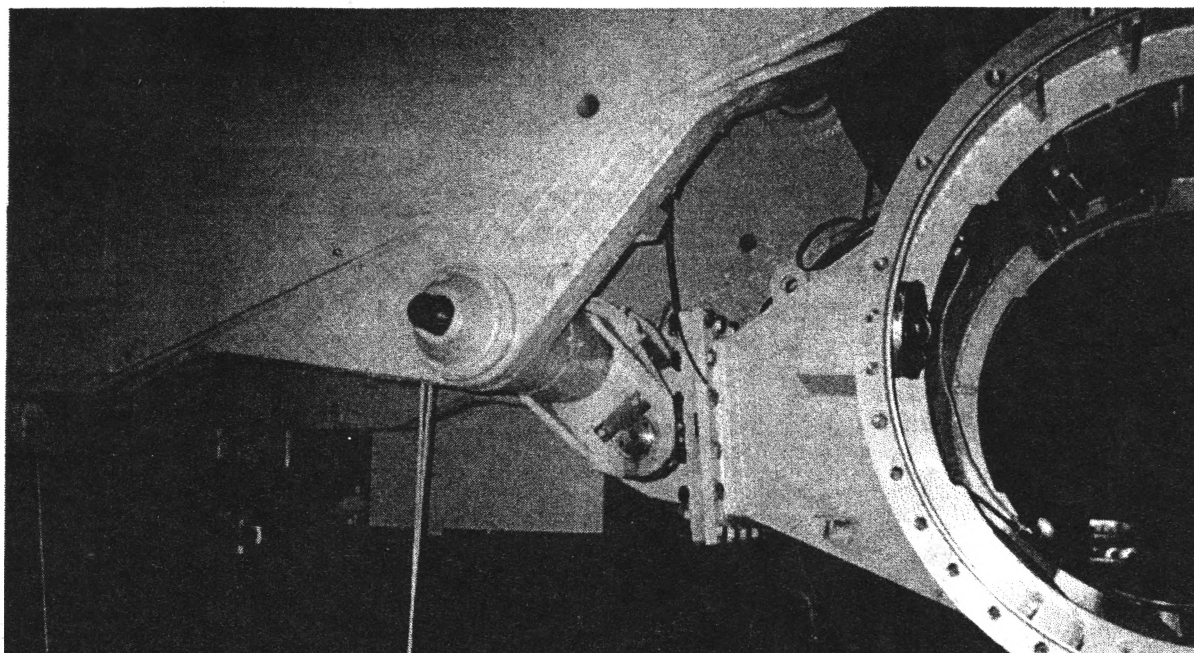


Рис. 9. Рама карьерного самосвала «Катерпиллер» (США) с литыми элементами (затемнены крупные отливки)



а)



б)

Рис. 10. Рама автосамосвала БелАЗ-7513, грузоподъемность 130 т:
 а) старая конструкция: «Опора», деталь «7513-2801380, сварная конструкция;
 б) новая конструкция: «Опора», деталь №7513-2801380, литая деталь.

Комплексная задача создания отливок и литосварных несущих конструкций повышенной равнопрочности для самосвалов особо большой грузоподъемности решена за счет создания и освоения в литейном и машиностроительном производствах новой низколегированной литейной стали 15НМФЛ (ТУ РБ 700012293.047-2004). Состав стали определяется необходимостью достижения однородности материала как при последовательных $\delta \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ превращениях на стадиях кристаллизации металла в отливке, так и при измельчении структуры на термических переделах, что позволяет в конечном счете добиться механической однородности литой структуры и сварных швов. Важнейшими элементами новизны в решении рассматриваемой задачи следует считать:

- содержание углерода в количестве (не выше 0,16%), обеспечивающем первичную кристаллизацию без образования γ -фазы в области перитектики;
- модифицирование с целью диспергирования структуры при кристаллизации;
- легирование молибденом, никелем и ванадием с учетом впервые изученных закономерностей распределения указанных элементов в зернограницных объемах зерен с целью создания «многослойной» границы первичных аустенитных зерен стали, а также с целью снижения свободной энергии границ аустенитных зерен при нагреве и измельчении действительного зерна при термообработке;
- обработка стали лигатурами с РЗМ, что увеличивает жидкотекучесть стали и возможность снижения толщины стенок отливок.

После стандартной термообработки (нормализация и последующий высокий отпуск) в новом материале стабильно формируется структура, в которой колонии ферритных зерен окаймлены перлитом (рис. 11), располагающимся в зоне границы первичного аустенитного зерна. Размер аустенитного зерна у стали 35Л не превышает №2 по ГОСТ 5639-82 (а часто равняется №(-2), в то время как в таких же деталях из стали 15НМФЛ размер зерна обычно равен №3-4, достигая №5.



Рис. 11. Сталь 15НМФЛ. Структура после нормализационного отжига (X100)

Размер действительных зерен после одинаковой окончательной термообработки в значительной мере определяется размером аустенитного зерна. Если в стали 35Л и 45Л размер ферритных зерен не превышает №5, то в стали 15НМФЛ он не ниже №10 по ГОСТ 5639-82.

Следует особо отметить высокие значения ударной вязкости материала отливки при отрицательной температуре: более 70 Дж/см^2 при -40°C . Это позволило впервые в практике производства карьерных самосвалов получать отливки в соответствии с требованиями третьей группы прочности по ГОСТ 5639-82. Сопrotивление усталости ($\sigma_{-1}=360 \text{ МПа}$) более чем в два раза превышает свойства стали 35Л.

Таким образом, впервые выявленные и изученные закономерности локализации пластической деформации и ее влияния на прочность деталей машин и конструкций, а также разработанные предложения, направленные на повышение несущей способности указанных компонентов машин путем управления химической и структурной однородностью конструкционных сталей, позволили реально повысить долговечность наиболее ответственных агрегатов карьерных самосвалов. Разработанные подходы рассматриваются как одни из основных при создании конкурентоспособных карьерных самосвалов пониженной металлоемкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мариев П.Л. Повышение конструкционной равнопрочности крупногабаритных деталей и сварных узлов карьерных самосвалов.—Мн., 2001.—180 с;
2. Трощенко В.Т. Усталость и неупругость металлов.—Киев, 1971.—268 с;
3. Терентьев В.Ф. Закономерности эволюции структуры при усталостном разрушении. Автореф. дис. д.т.н.—М., 1986;
4. Моисеенко В.И., Мариев П.Л. Основы структурной равнопрочности стали и элементов крупногабаритных деталей машин.—Мн., 1999.—

200 с; 5. Справочник металлиста. Т.1/Под ред. С.А.Чернавского.—М., 1976.—768 с; 6. Гудремон Э. Специальные стали. В 2 т.—М., 1966.—736 с; 7. Патон Б.Е. Современные направления повышения прочности и ресурса сварных конструкций// Автоматическая сварка.—№9, 10.—2000.— С. 3-9.

УДК 621.791.92

А.П. Ракомсин, Л.М. Кожуро, М.И. Сидоренко

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ ОБРАБОТКОЙ В КОМБИНИРОВАННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

*РУП Минский автомобильный завод,
Белорусский государственный аграрный технический университет,
Минск, Беларусь*

Для восстановления и упрочнения деталей машин применяют различные способы нанесения покрытий, позволяющие получать рабочие поверхности с требуемыми эксплуатационными свойствами. Каждый из известных способов нанесения покрытий в силу своих особенностей имеет рациональную область применения и не всегда решает задачи вызванные необходимостью восстановления и повышения долговечности деталей машин. Поэтому, наряду с совершенствованием известных способов нанесения покрытий, необходима разработка новых, дополняющих уже известные и расширяющих их технологические возможности. При этом актуальным является совмещение способов восстановления и упрочнения изделий, использующих комбинированное воздействие потоков энергии различного вида на обрабатываемую поверхность. Это позволяет получать качественно новые эксплуатационные характеристики поверхностей деталей, а также повышать производительность, снижать энергоёмкость и себестоимость процессов.

Необходимо отметить, что многие детали машин, поступающие на восстановление, имеют значительный запас остаточной долговечности, использование которой составляет основной источник экономической эффективности ремонта машин. Так Япония удовлетворяет потребность в запасных деталях на 40% путем восстановления изношенных, США, Германия, Австрия - на 30 -35%, а СССР в 1990 году удовлетворял эту потребность на 18% [1].

В последние годы широко исследуется и получает практическое применение электромагнитная наплавка (ЭМН), использующая энергию магнитного и электрического полей. Поскольку связкой порошка при ЭМН служит энергия магнитного поля, а расплавление – электрического, то появляется возможность существенным образом изменить условия восстановления и упрочнения деталей машин при ЭМН с поверхностным пластическим деформированием, т.е. обработкой в комбинированных физических полях [2].

Разработанный метод электромагнитной наплавки с поверхностным пластическим деформированием позволил увеличить в 1,3... 1,4 раза ресурс деталей типа тел вращения, работающих в условиях высоких нагрузок и интенсивного абразивного изнашивания. Такой результат получен за счет того, что новый метод упрочнения деталей сочетает нанесение, термообработку и упрочняющее деформирование