

Леонтьев Л. Б.

**Конструктивно-технологические способы
повышения надежности втулок цилиндров судовых дизелей**

1. Введение.

Работа морского и речного флота в современных рыночных условиях в значительной степени зависит от его технического состояния, уровня его эксплуатации и ремонта. В комплексе вопросов, связанных с повышением рентабельности использования флота, одно из важных мест занимает увеличение эксплуатационной надежности судов. Этот вопрос касается прежде всего эксплуатации судовых энергетических установок, среди которых в настоящее время преобладают дизельные.

Надежность дизельного двигателя, в свою очередь, определяется долговечностью его деталей и узлов и зависит от эксплуатационных, технологических и конструктивных факторов.

Эксплуатационные факторы заключаются в выборе оптимальных режимов температурного и механического нагружения, режимов смазки и топливоиспользования, режима водоподготовки.

Конструктивные - в выборе таких конструкций деталей и узлов, которые бы повышали экономическую и эксплуатационную эффективность использования дизельных двигателей (установка демпфирующих прокладок между головкой цилиндра, цилиндровой втулкой и блоком, устранение вибрации втулок посредством применения новых конструкций посадочных буртов и др.).

Технологические - в применении таких материалов, которые бы эффективно сопротивлялись износу, коррозии, кавитации и разрушению (применение биметаллических втулок, кадмирование и хромирование поверхности охлаждения втулок и др.)

В данной работе рассматривается одна из наименее долговечных и наиболее нагруженных деталей цилиндро-поршневой группы – цилиндровая втулка, которая во многом определяет длительность эксплуатационного периода дизеля.

Втулка испытывает значительные механические и тепловые напряжения. Во время работы двигателя на ее стенки действует сила давления газов, боковая сила давления и сила трения, возникающая при движении поршня.

Втулка нагревается горячими газами и в результате трения поршневых колец. Для того чтобы температура стенок поддерживалась в допустимых пределах, втулки охлаждаются водой, циркулирующей в зарубашечном пространстве цилиндров. Перепад температур по обе стороны стенки создает температурные напряжения в ней, причем более горячие волокна внутренней поверхности испытывают напряжения сжатия, холодные волокна (со стороны полости охлаждения) - напряжения растяжения.

Стенки втулки разрушаются от коррозии и эрозии, возникающей в результате вибрации. С внутренней стороны действует электрохимическая и химическая коррозия, протекающая особенно интенсивно при сжигании сернистого топлива, с наружной - электрохимическая коррозия и химическая (под воздействием кислорода, растворенного в воде).

Таким образом, к материалу втулок предъявляется целый комплекс требований: повышенная прочность, износостойкость, непроницаемость для газов и воды (плотность отливок), устойчивость против коррозии.

Кроме этого в работе анализируются причины выхода из строя цилиндрических втулок. Предлагаются меры и способы увеличения их срока службы (Табл. 1, 2).

2. Надежность цилиндрических втулок.

Анализ отказов втулок цилиндров большинства малооборотных и среднеоборотных дизелей, установленных на судах Дальневосточного бассейна, показал, что наиболее распространенным видом отказа втулок является образование трещин в галтели опорного бурта. Втулки цилиндров с трещинами в галтели выбраковываются, при этом их наработка, как правило, не превышает одной трети назначенного ресурса, а износ внутренней рабочей поверхности составляет 10-30% от предельно допустимого. Из-за этого судовладельцы несут значительные материальные затраты на приобретение и установку новых втулок, обладающих таким же низким ресурсом.

Однако проведенные исследования и эксплуатационные испытания опытных партий втулок цилиндров показывают, что повышение их надежности конструктивно-технологическими способами является одним из наиболее перспективных и экономичных направлений обеспечения их длительной и эффективной эксплуатации [1-7].

Выбор конструктивных и технологических решений, направленных на повышение надежности втулок цилиндров, проводили после расчета и анализа напряженного состояния наиболее напряженной ее части - галтели опорного бурта. Расчет напряжений производили с использованием метода конечных элементов.

Снизить уровень напряжений в опасном сечении втулки или повысить ее несущую способность для уменьшения вероятности образования трещины в галтели опорного бурта можно следующими способами:

Таблица 1

Сравнительные показатели надежности цилиндровых втулок

N, п/п	Марка двигателя	Количество обследованных		Средняя скорость изнашивания, мм/1000 ч	Срок службы по износу,		Причины замены, %			
		Двигателей	Втулок		Расчет- ный	Фактичес- кий	Кавитац. разруше- ния	Трещины в галтелях	Кавитац. разрушения и трещины	Износ поверх- ности трения
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	6Л525ПР	14	186	0,06	45	18,0	20	60	20	-
2	6Л525ПР	23	162	0,05	50	24,0	26	50	22	-
3	ДМ650 В-90	16	172	0,05	45	22,5	50	30	20	-
4	8ТД-48	26	376	0,05	50	26,0	60	10	30	-
5	8 ДР 43/61	9	112	0,06	45	27,0	50	10	30	10
6	6Д50М	24	360	0,03	30	14,0	30	50	20	-
7	8NVD-48AU	29	232	0,04	40	13,5	40	15	30	15
8	8NVD-48A2U	12	114	0,04	40	17,0	20	30	40	10
9	550TB-110	2	18	0,07	40	22,0	30	20	40	10
10	662 T2B -140	4	24	0,07	50	35,0	-	45	15	40
11	652/90	8	56	0,05	50	45,0	-	10	15	75

Таблица 2

Сравнительный анализ методов повышения кавитационно-эрозионной стойкости охлаждаемых поверхностей цилиндрических втулок дизелей [8 – 11]

N п/п	Способы упрочнения	Особенности технологического процесса	Эксплуатационные характеристики цилиндрических втулок			
			Относительная кавитационная стойкость	Конструк- тивная прочность %	Износостой- кость зеркала, %	Теплопро- водность, %
1	2	3	4	5	6	7
1.	Центробежное литье	СЧ 25 (без упрочнения)	1,0	100	100	100
2.	Электролитичес- кое хромирова- ние	Молочный хром, оптимальная толщина защитного слоя (20...25 мкм)	1,5...2,0	100	100	100
3.	Диффузионное хромомаргани- рование	Нагрев до 1050° С, выдержка 8 ч; толщина слоя до 60 мкм.	10...12	-	-	100
4.	Диффузионное титанирование	Нагрев до 900...1000 °С, выдержка 8 ч; толщина слоя до 100 мкм	5...6	-	-	100
5.	Поверхностное легирование чугунных отли- вок втулок, не подвергающихся механической обработке	Проводится непосредственно в литейной форме; толщина легированного слоя 2,0 на поверхности отливки до 1 мм	2,0	100	100	100
6.	Отбеливание водоохлаждае- мой поверхности цилиндрических втулок из чугуна	Отбеливание слоя глубиной до 0,2 мм происходит при оплавлении поверхности пучком электронов	1,5...2,0	100	100	-

- разработкой и внедрением новых (более прочных чем чугун марок СЧ25 или СЧ30) материалов, применяемых в настоящее время для изготовления втулок;
- снижением уровня монтажных напряжений в опасном сечении опорного бурта за счет устранения изгибающего момента от затяжки шпилек путем переноса посадочных мест втулки и крышки цилиндра с поверхности А на поверхность Б (рисунок 1);

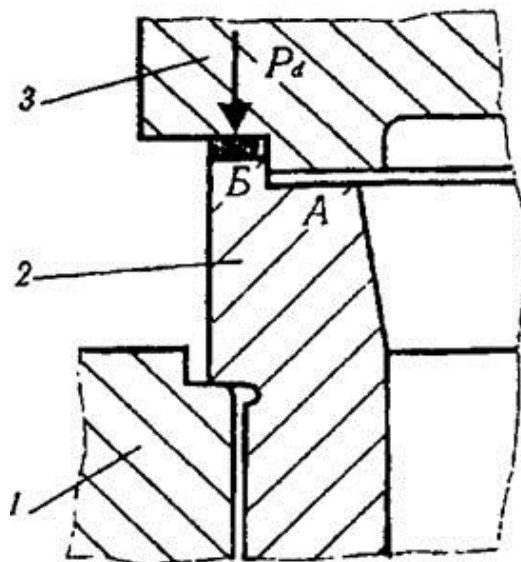


Рисунок 1 - Конструкция узла «блок цилиндра - втулка - крышка цилиндра»:
1 - блок цилиндров; 2 - втулка цилиндра;
3 - крышка цилиндра

- упрочнением материала в районе галтели опорного бурта поверхностным пластическим деформированием (ППД);
- созданием биметаллической конструкции втулок с более высокими прочностными свойствами материала тела втулки в районе галтели опорного бурта, как с последующим ее упрочнением ППД, так и без упрочнения;
- уменьшением зазора в сопряжении «блок-втулка цилиндра» до теплового для снижения амплитуды колебаний втулки цилиндра и уменьшения напряжений, вызываемых этими колебаниями.

Одним из перспективных способов повышения надежности втулок цилиндров является применение высококачественных чугунов с «червеобразным» графитом (предел выносливости 147-161,8 МПа). Однако изготовление из данного материала втулок в условиях СРЗ пока не налажено. Применяемые в настоящее время чугуны марок СЧ25 и СЧ30 для изготовления втулок обладают низким пределом выносливости: 90-132 МПа у втулок цилиндров СОД и 80-105 МПа у втулок МОД.

Исследование напряженного состояния втулки цилиндра привело к необходимости экспериментальной проверки целесообразности конструктивных изменений в узле крышка цилиндра - втулка. Проведенные, модельные испытания втулок позволили

установить, что устранение изгибающего момента повышает предел выносливости втулки в 1,4 раза. Устранение изгибающего момента достигается путем установки крышки цилиндра на верхний пояс торца втулки (см. рис. 1) для этого необходимо сделать дополнительную выточку на верхнем поясе втулки под прокладку. Данное решение не требует больших конструктивных изменений в узле «крышка цилиндра – втулка» и легко осуществимо и заводских условиях.

Анализ напряженного состояния втулки показал (рис. 2), что слой материала, напряженное состояние которого превышает предел выносливости, незначительных размеров и охватывает по длине часть галтели втулки и распространяется в ее тело на глубину до 2 мм (предел выносливости модели втулки из чугуна марки СЧ25 составляет всего 67 МПа.) В связи с этим необходимо проводить упрочнение галтели опорного бурта втулки ППД.

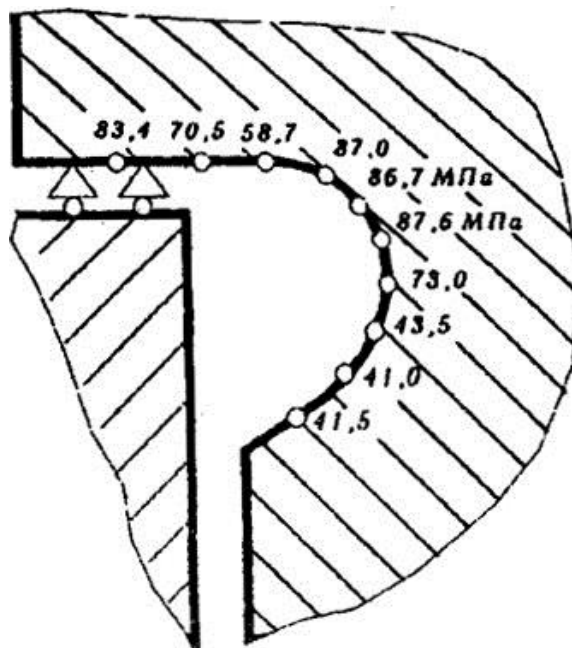


Рис. 2. Интенсивность напряжений в галтели
внутри цилиндра дизеля 6ДКРН67/170.

Метод импульсного ППД позволяет получить глубину наклепа от 6 до 13 мм (зависит от структуры чугуна и режима упрочнения), повысить предел его выносливости в 1,7 раза. Доминирующее влияние на повышение выносливости оказывают остаточные напряжения сжатия, достигающие 140 МПа в верхних слоях упрочненного слоя чугуна, которые сдвигают критические напряжения в область более высоких значений, а также замедляют процесс зарождения и развития микрповреждений. Кроме того, остаточные напряжения сжатия снижают чувствительность поверхности к локализации напряжений

от внешних усилий вблизи конструктивных и технологических концентраторов (галтелей).

Метод повышения усталостной прочности втулок ППД целесообразно применять как для новых втулок, так и для втулок, находящихся в эксплуатации и имеющих трещины в галтели опорного бурта при их распространения не более 20% от толщины стенки втулки.

Устранение трещины производят механическим путем в направлении ее распространения. Последующий наклеп повышает несущую способность до уровня новой, не упрочненной ППД. В настоящее время на основании исследований разработаны и согласованы технические документы с инспекцией Регистра РФ, что позволяет распространить этот способ повышения надежности втулок цилиндров на СРЗ других заводов страны.

Задача повышения усталостной прочности втулок цилиндров может быть решена путем создания биметаллической конструкции втулки в районе галтели опорного бурта (рисунок 3). Идея была реализована при восстановлении втулок цилиндров дизелей 6VD 26/20, которые успешно прошли эксплуатационные испытания на судах в течение 5 лет. При восстановлении втулок была использована технология газовой наплавки порошком на никелевой основе ПГ-10Н-04. Последующее упрочнение галтели ППД позволяет получать предел выносливости биметаллических образцов 150 МПа. Однако данная технология наплавки может быть рекомендована для втулок с трещиной глубиной до 7 мм. При глубине трещины свыше 7мм целесообразно применять горячую сварку порошковыми проволоками ПП-АНЧ-5 или ППВЧ-1, обеспечивающими в наплавленном металле чугуна с шаровидной формой графита.

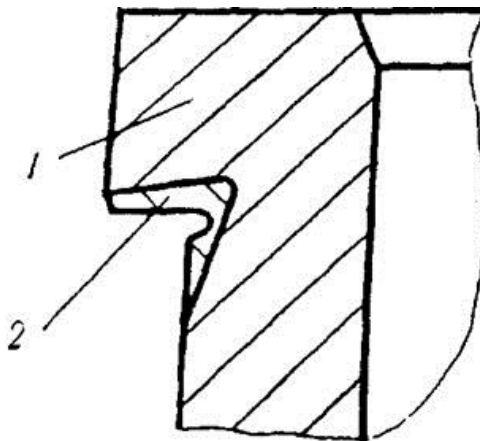


Рис. 3. Конструкция биметаллической втулки цилиндра:
1- основной металл; 2 - наплавленный металл.

При отсутствии перечисленных сварочных материалов возможно изготовление штучных сварочных электродов в условиях СРЗ со стержнем из чугуна марки СЧ25 и покрытием, обеспечивающим получение в наплавленном металле структуры серого перлитного или перлитно-трооститного чугуна и не содержащие дефицитных материалов. Разработанный электрод с фтористо-кальциево-графитным покрытием позволяет получить сварное соединение, имеющее предел выносливости 106 МПа (предел выносливости основного металла - чугуна втулки ДКРН62/140-3-80 МПа). Последующее упрочнение ППД повышает предел выносливости сварного соединения до 150 МПа.

В процессе эксплуатации дизелей происходит износ посадочных поверхностей сопряжения «блок-втулка цилиндра», в результате которого возрастают зазор в нижнем посадочном поясе и амплитуда колебаний втулки и соответственно увеличиваются напряжения в опасном сечении опорного бурта втулки. Восстановить зазор в сопряжении можно, как наплавкой только посадочных поверхностей втулки, так и наплавкой сопряженных поверхностей, как втулки, так и блока. Для наплавки посадочных поверхностей втулки цилиндра разработана технология плазменной наплавки сплавами на медной основе и проволокой аустенитного класса.

Таким образом, для повышения надежности втулок цилиндров необходимо применять упрочнение ППД галтелей в районе верхнего опорного бурта как у новых втулок, так и у находящихся в эксплуатации (если глубина трещины не превышает 20% толщины стенки втулки) во время ремонта судна; при глубине трещины свыше 20% ее толщины возможно восстановление втулки методами горячей сварки с последующим упрочнением ППД; при износе посадочных поверхностей втулки целесообразно их восстановление плазменной наплавкой. Все предложенные нами способы повышения надежности втулок цилиндров могут быть реализованы в условиях СРЗ.

3 Лазерное упрочнение втулок цилиндров мощных судовых дизелей.

Параметры рабочего процесса современных мощных судовых дизелей достигли в настоящее время такого уровня, что некоторые детали двигателей, изготавливаемые по традиционной технологии, по своим характеристикам уже не могут соответствовать требованиям длительной стойкости против изнашивания.

Это относится в первую очередь к трущимся парам: поршневое кольцо - втулка цилиндра (ВЦ), кольцо — головка поршня.

Необходимо дальнейшее повышение стойкости рабочей поверхности ВЦ (твердости) с одновременным улучшением условий смазки. Однако высшая твердость, которую удастся получить путем модифицирования чугуна, идущего на изготовление ВЦ, является величина 240-250 НВ. При этом следует учесть, что компоненты таких сплавов дороги, а их получение затруднено.

В последнее время для небольших двигателей нашли широкое применение наносимые на рабочие поверхности ВЦ гальваническим способом упрочняющие покрытия из хрома и никеля, главным образом с целью восстановления.

Большая серия испытаний, проведенная фирмой МАН в этом направлении на двухтактных дизелях с ВЦ новой конструкции, была предпринята с целью создания более эффективного покрытия, защищающего рабочие поверхности от изнашивания, однако они закончились неудачей и были прекращены.

Весьма ценным оказался метод нанесения (диспергирования) никеля с твердыми добавками на рабочие поверхности ВЦ небольших двигателей. Как правило, содержание таких компонентов (SiC) в никелевой матрице составляет 3-4% (nikasil)

Прежде, чем обработанные этим способом ВЦ были использованы в двухтактном крейцкопфном двигателе с контурной продувкой, проводилась большая серия испытаний на специально спроектированном четырехцилиндровом двигателе с тронковыми поршнями (диаметр 230мм, ход - 340 мм, цилиндровая мощность 112 кВт).

Результаты испытаний показали, что рабочие поверхности ВЦ с покрытием, в сочетании с компрессионными кольцами, изготовленными из закалённого легированного чугуна, представляют собой идеальную комбинацию.

Уменьшение степени износа по сравнению с применявшимися ранее стандартными комбинациями оказалось таким значительным, что было решено покрыть: поверхности нескольких ВЦ диаметром 520 мм слоем никасина 1 мм.

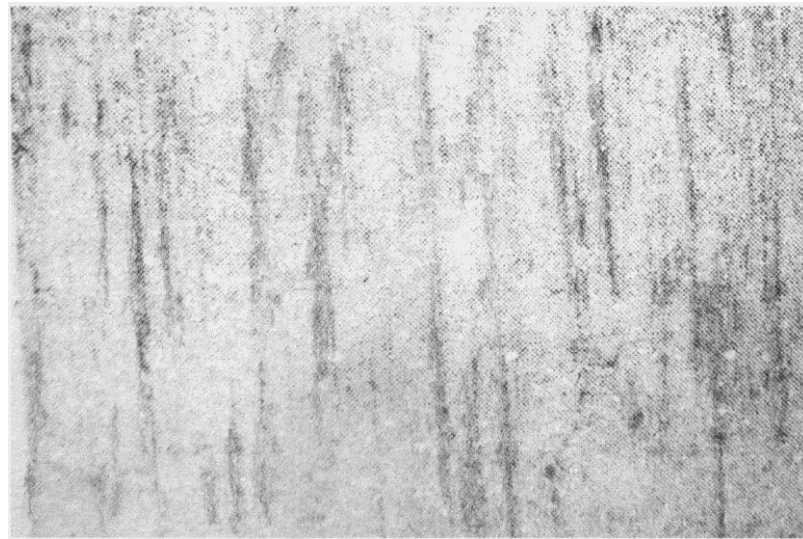


Рисунок 4 - Неизношенная поверхность втулки цилиндра с никелевым покрытием в районе ВМТ первого компрессионного кольца. Видны следы царапин, оставленных частицами SiC. Увеличено в 50 раз.

Широкое распространение получило азотирование рабочей поверхности ВЦ четырехтактных дизелей, где твердость и глубина упрочненной зоны также служат важными факторами повышения износостойкости. Влияние азотирования распространяется на глубину 6-12 мкм, твердость упрочненного слоя постепенно уменьшается и на глубине от 0,1 до 0,3 мм приобретает твердость основного металла

Эта технология, применяемая многими дизелестроительными фирмами, в определенной мере способствует предупреждению ускоренного изнашивания цилиндрических трущихся пар, однако достигаемые при азотировании толщины упрочненных зон для крупных четырехтактных среднеоборотных двигателей недостаточны.

Для двухтактных же дизелей такие упрочненные слои слишком тонки, чтобы значительно продлить срок службы ВЦ.

Варьируя в опытных работах состав серого чугуна и методы азотирования, углубить зону диффузии не удалось.

В последнее время для повышения твердости рабочих поверхностей ВЦ используют мощные лазеры. Они позволяют осуществлять локальный нагрев участков

внутренней поверхности втулки, с заданной (регулируемой) интенсивностью, при этом не требуется принудительное охлаждение нагретого участка. Таким образом происходит поверхностная закалка чугуна.

Первые результаты испытаний ВЦ, упрочненных лазером, показали, что примененная технология неприемлема для высоконагруженных дизелей с большим диаметром втулок. Поэтому дальнейшие работы проводились с учетом следующих требований:

- упрочненные зоны должны иметь максимальную глубину и равномерную по глубине твердость;
- упрочнению подлежат области наибольшего износа втулок для придания им максимальной твердости без повреждения поверхностного слоя.

Из числа испытанных марок чугунов наибольшая глубина оказалась у мартенситного чугуна - до 1,5 мм; ледебуритная структура может быть увеличена на глубину до нескольких миллиметров. Метод повторного плавления позволяет получать рабочие поверхности высокой износостойкости, но только на втулках из специальных марок чугуна, не дающего при лазерной обработке горячих трещин.

С помощью линз, получаемых от производителей лазерного оборудования, фирме «МАН – «Бурмейстер и Вайн» (МАН - БиВ) удалось создать упрочненную зону в форме чечевицы по глубине. Линзы, специально созданные фирмой МАН, сделали возможным получение прямоугольных фокусных пятен, которые в зависимости от наклона луча лазера к оси ВЦ могут быть повернуты таким образом, что оси симметрии фокусного пятна и упрочняющего луча будут совпадать. При этом энергия по всему поперечному сечению лазерного луча распределяется равномерно, что позволяет получать почти прямоугольные зоны твердости. На рисунке 5 показан процесс упрочнения ВЦ. Виден оптимально сфокусированный лазерный луч.

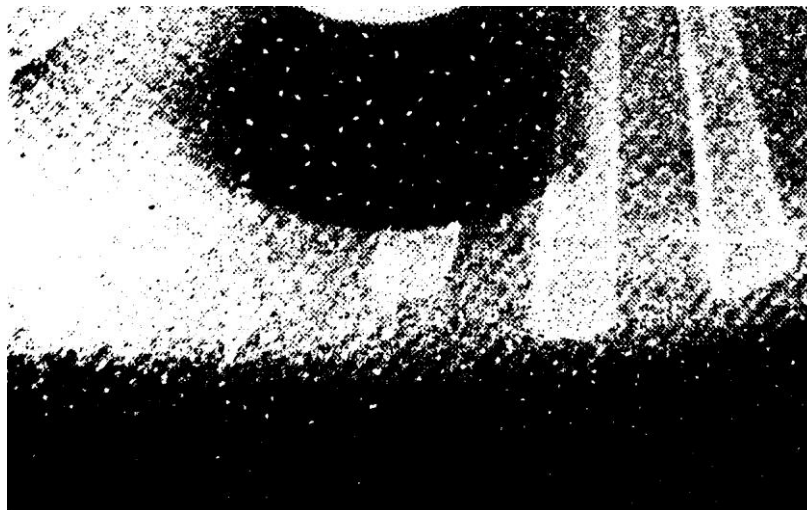


Рисунок 5. Процесс лазерного упрочнения поверхности ВЦ оптимально сфокусированным лучом.

В процессе усовершенствования лазерной технологии возникало множество вопросов относительно материалов, состояния упрочняемых поверхностей, износостойкости (в зависимости от уровня твердости), соответствия материалов поршневого кольца условиям трения, расхода смазки и т.д. Упрочняемые поверхности должны быть подготовлены таким образом, чтобы энергия лазерного луча не отражалась, а поглощалась.

Кроме решения всех этих вопросов, необходимо было создать систему управления процессом упрочнения ВЦ наиболее крупных двухтактных дизелей.

Напряжения, возникающие в поверхностном слое, подвергнутому лазерному упрочнению, не должны превышать допустимый предел, поскольку образующиеся при этом хрупкие большие участки могут быть причиной возникновения трещин.

Эта проблема вызвала наиболее серьезные трудности; она потребовала анализа внутренних напряжений и изучения их влияния. Анализ концентрировался на следующих моментах:

- характер влияния параметров процесса и схемы упрочнения на различные материалы; обработка поверхности;
- термическая обработка;
- динамическая прочность как средство определения влияния на повышение твердости геометрии упрочненных зон и термической обработки (в случае появления начальных трещин и изломов).

Результаты анализа позволили в дальнейшем осуществлять упрочнение таким образом, что трещины больше не появлялись ни после завершения процесса лазерной обработки, ни во время работы двигателя.

С целью проверки износостойкости ВЦ на двигателе в экстремальных условиях было испытано шесть видов чугуна:

- низколегированный серый чугун;
- двухкомпонентный серый чугун по спецификациям МАН-БиВ;
- аналогичный чугун без фосфора;
- то же с малым содержанием фосфора;
- легированный чугун по спецификации компании «Дженерал Моторс»

(США).

Испытания, проводившиеся на двухтактном и четырехтактном двигателях, выявили два вида серого чугуна, пригодные в равной степени.

Испытания показали также, что материал рабочей поверхности поршневого кольца, давший положительные результаты в сочетании с упрочненной ВЦ, сохраняет постоянной или снижает скорость изнашивания по сравнению с тем же материалом неупрочненной втулки.

Одновременно испытаниям были подвергнуты 13 видов материалов и покрытий для первого компрессионного кольца, в том числе:

- обычные, выпускаемые промышленностью кольца из серого чугуна без покрытия;
- непокрытые кольца из отпускаемого чугуна;
- кольца из переплавленного серого чугуна;
- обычные, выпускаемые промышленностью кольца, полученные методом горячей прессовки.

Несмотря на то, что эти материалы различны по степени соответствия требованиям, предъявляемым к парам трения с участием упрочненной поверхности ВЦ, в эксплуатации все четыре перечисленных вида материалов обеспечили одинаковую или более низкую скорость изнашивания втулок.

Испытания материалов трущихся поверхностей проводились только на двигателях, поскольку результаты предыдущих исследований, выполненных на испытательных стендах, часто приводили к дорого обходящимся ошибкам. Кроме того, при оптимизации

системы трения трудно перенести полученные на малых двигателях результаты на двигатели больших размеров.

Целью испытаний, проводившихся на натурных двигателях, был также выбор оптимальной геометрии упрочненных зон и режимов обработки поверхности.

В испытаниях использовались двигатели следующих типов: двухтактные 4LJW23/34, K3EZ252/105 и 1LGFCA55; четырехтактные 1L23/30, 4V32/36, 8L40/45, 9L40/45, 12V25/30, 8L52/55B, 3L58/64.

Двигатели 4LJW23/34 и 1L23/30 были использованы для исследования скорости изнашивания рабочей поверхности в верхней части цилиндра (в районе ВМТ первого компрессионного кольца) с применением радиоизотопной техники. Этот метод позволяет быстро произвести оценку большого числа вариантов испытываемых трущихся поверхностей.

На четырехцилиндровых двигателях одновременно было установлено четыре компонента с радиоактивной меткой. Как в этом, так и в другом случае измерительные системы были представлены одной и той же аппаратурой, общая масса которой составляет 15 кг. При этом система обмера ВЦ была настолько упрощена, что ее можно было легко использовать на двигателе в период опытной эксплуатации.

За время испытаний было использовано 37 упрочненных ВЦ и затрачено в общей сложности около 6000 ч эксплуатационного времени. На рис. 6 показаны использованная и новая ВЦ, упрочненная в соответствии с различными техническими условиями.

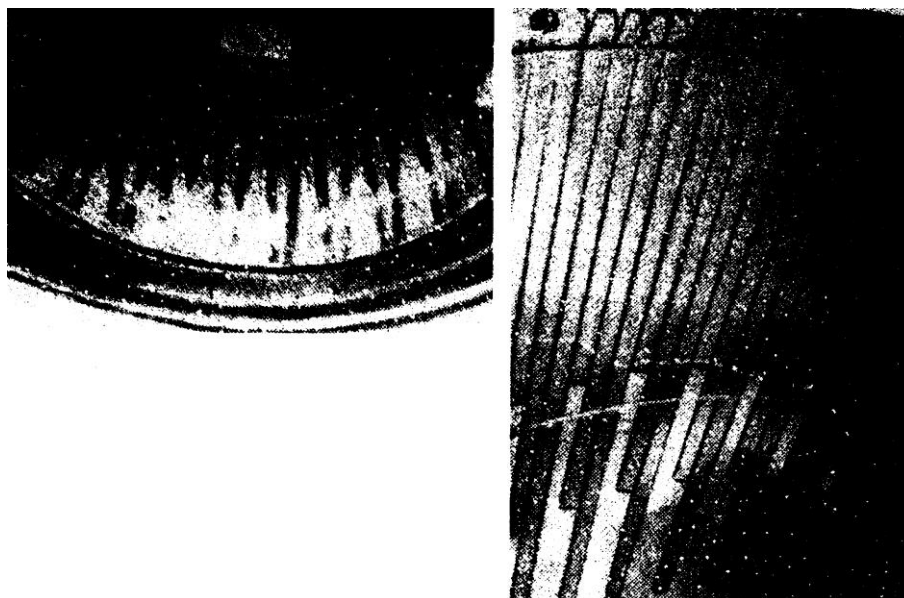


Рис. 6. Упрочненные лазером рабочие поверхности втулок цилиндров: а-ВЦ диаметром 520 мм двухтактного дизеля через 30 ч эксплуатации; б - ВЦ диаметром 750 мм перед финишной механической обработкой поверхности.

Результаты испытаний однозначно показали, что сопротивление всему комплексу факторов изнашивания втулок с повышенной твердостью, полученной с помощью лазера, значительно выше, чем у обычных или азотированных втулок,

Последние упомянуты в связи с тем, что тонкие, хотя и очень твердые участки поверхности втулки в районе ВМТ первого компрессионного кольца изнашиваются сравнительно быстро и, таким образом, в этой конкретной зоне азотированная ВЦ практически не отличается от обычной.

Эксплуатационные испытания проводились двумя дизелестроительными фирмами на двухтактных двигателях марок K9SZ52/105CL, K5SZ70/150C/CL, 6-L55GFC и четырехтактных, марок 18V52/55A, 6-9L40/45, 12V32/36 и 8L32/36 в течение 10000ч.

Проблем в эксплуатации не возникало даже тогда, когда знание о схеме упрочнения было неполным: на рабочих поверхностях ВЦ дефектов не наблюдалось несмотря на то, что использованная для них схема упрочнения могла привести к образованию трещин.

На рис. 6 показана поверхность упрочненной лазером ВЦ четырехтактного двигателя первого поколения после наработки 5877 ч, на рисунке ВЦ двухтактного двигателя первого поколения после наработки 12683 ч. Как и предполагалось, средняя величина износа их рабочей поверхности в районе МВТ первого компрессионного кольца была значительно меньше, чем у обычных втулок цилиндров. Износ поршневого кольца был в среднем также меньше по сравнению с поршневыми кольцами серийного производства.

Процесс лазерного упрочнения запатентован, все большее число среднеоборотных четырехтактных двигателей и малооборотных двухтактных двигателей изготавливается с ВЦ, которым придана повышенная твердость, а эксплуатационные испытания подтвердили, что степень их износа в районе ВМТ снижается на 30-60%.

Более того, хорошие условия трения и специальная конфигурация упрочненных зон рабочей поверхности ВЦ позволяют использовать поршни и кольца, в меньшей степени нуждающиеся в смазке, как было проверено в эксплуатации дизелестроительными фирмами. В результате таких усовершенствований дополнительные капитальные затраты на упрочненные втулки цилиндров быстро окупаются.

В результате многолетних исследований, производимых фирмой «МАН – «Бурмейстер и Вайн» на двигатели, подверженные значительным нагрузкам, устанавливаются упрочненные с помощью разработанной лазерной технологии

цилиндрические втулки большого диаметра. В своих работах компания пользуется научно-технической программой Министерства исследований и технологий, а также научной помощью собственного сектора передовой технологии.

По сравнению с другими техническими усовершенствованиями крупных дизелей, упрочненные с помощью лазера ВЦ обладают наибольшей способностью противостоять абразивному изнашиванию в течение длительного времени, что подтверждено не модельными испытаниями или теоретическими расчетами, а экспериментами, проводившимися на натурных двигателях.

Наибольшее преимущество новой технологии заключается в улучшении условий трения по сравнению с не обработанными лазером поверхностями и в повышении износостойкости трущихся пар при мини-мольных количествах смазки, что обеспечивает существенное снижение ее расхода.

Во многих случаях опытная эксплуатация ВЦ проходила в условиях высокой коррозионной активности, однако это не повлекло за собой негативных последствий, чем еще раз была подтверждена пригодность лазерной технологии для упрочнения рабочих поверхностей ВЦ дизелей больших размеров.

В настоящее время проектно—конструкторскими и научными организациями Министерства морского флота РФ проводятся исследования и эксперименты по применению лазерных технологий для упрочнения деталей цилиндропоршневой группы мощных судовых дизелей.

Эти работы включены в отраслевую научно-техническую программу «Повышение технического уровня морского флота, совершенствование его технической эксплуатации и деятельности судоремонтных заводов» до 2025 г.

Определенных успехов в области лазерного упрочнения рабочих поверхностей втулок цилиндров дизелей типа Д100 и головок поршней дизелей типа МАН 6KZ57/80 и «Зульцер» RD76, RND76 добились специалисты Дальневосточного ВИМУ им. адм. Г. И. Невельского. Ведется также организационная работа по более полному к всестороннему исследованию вопросов эффективности и целесообразности лазерного упрочнения применительно к различным деталям судовых технических средств.

4. Материалы и технологии для повышения надежности ЦВ.

Ведущие зарубежные дизелестроительные фирмы в течение ряда последних лет ведут интенсивные исследования по поиску новых материалов для цилиндрических втулок

дизелей и технологических способов обработки их рабочей поверхности. Основным требованием к новым материалам является высокая механическая прочность, которая позволила бы повысить давление в цилиндрах дизеля - дальнейшего увеличения цилиндровой мощности и снижения удельного расхода топлива. Вместе с тем новые материалы должны обладать высокой износостойкостью, чем облегчалось бы применение в дизелях низкокачественных тяжелых топлив.

Фирма MAN-B & W с 1977 г. применяет для изготовления цилиндрических втулок материал, известный под названием таркэллой (tarkalloy) - чугун с пластинчатым графитом, содержащий небольшое количество бора и фосфора. Он обладает высокой износостойкостью, а его временное сопротивление разрыву составляет 252 МПа. Этими качествами обеспечивалось успешное применение таркэллой в течение 20 лет. Однако по мнению специалистов фирмы, стремление к повышению давления в цилиндрах при разработке новых типов дизелей начинает в настоящее время сдерживаться именно применением этого материала, так как при достигнутых значениях максимального давления он работает практически на пределе своих возможностей. Этим обусловлена необходимость поиска новых материалов, которые позволили бы предпринимать дальнейшее повышение давления в цилиндрах.

Активное участие в поисках новых материалов для цилиндрических втулок принимает японская фирма Mitsui, являющаяся одним из основных лицензиатов фирмы MAN-B & W. Проведя лабораторные испытания большого количества разновидностей чугуна, фирма Mitsui остановила свой выбор на высококачественном чугуне с червеобразным графитом и удачно сочетает их положительные свойства: высокую механическую прочность, как у чугуна с шаровидным графитом, и хорошую износостойкость, как у чугуна с пластинчатым графитом. Кроме того, этот чугун обладает хорошей жидкотекучестью и дает очень малые усадки в процессе отливки изделий. Он содержит следующие химические компоненты, % по массе: C-3,8; Si-1,74; Mn-0,02; S-0,019; Cu-1,48; Sn-0,032; Ze-0,01; Mg-0,024.

Дальнейшим испытаниям были подвергнуты три варианта чугуна с «червеобразным» графитом: не содержащий присадок бора и фосфора, содержащий присадку бора и содержащий присадки бора и фосфора. Сравнивались механические свойства этих вариантов чугуна и таркэллой (табл. 3).

Таблица 3. Механические свойства чугунов с «червеобразным» графитом и таркэллой.

Материал	Временное сопротивление разрыву, МПа	Усталостная прочность, МПа
Чугун без присадок бора и фосфора	379,5	147,1
Чугун с присадкой бора	330,5	147,1
Чугун с присадками бора и фосфора	330,5	161,8
Таркэллой	252,0	88,3-107,9

Были изготовлены три цилиндрические втулки (диаметром 350 мм, рассчитанные на ход поршня 1050 мм) — по одной втулке из каждого исследуемого варианта чугуна. Проведены сравнительные испытания этих втулок, а также втулки таких же размеров из таркэллой на лабораторном стенде со специальной аппаратурой для измерения износа и прихвата поршневых колец (рис. 7). При проведении испытаний в паре со всеми цилиндрическими втулками работали поршневые кольца из материала, традиционно применяемого фирмой MAN-B&W. Кольца были укреплены на стенде неподвижно, а втулке придавалось вращательное движение.

Как видно из диаграмм (см. рисунок 8), чугун с «червеобразным» графитом с присадками бора и фосфора обладает в два раза более высокой сопротивляемостью прихвату колец, чем таркэллой, немного уступая ему в износостойкости (около 10%). Поэтому этот чугун признан наиболее подходящим материалом для цилиндрических втулок в будущем. Далее втулками из этого материала был оборудован опытный дизель 7L35 MC и проведены его испытания в течение более 6000 ч с измерениями износа цилиндрической втулки и верхнего поршневого кольца. Данные измерений сопоставлялись с данными для такого же дизеля, но с втулками из таркэллой. Установлено, что в течение первых 5000 ч работы износ втулок для обоих дизелей практически одинаков и находится в диапазоне 0,01—0,02 мм/1000 ч. Износ верхнего поршневого кольца для опытного дизеля не превышает 0,15 мм/1000 ч, тогда как для дизеля со втулками из таркэллой он достигает 0,25 мм/1000 ч. Этими испытаниями подтверждены хорошие качества чугуна с «червеобразным» графитом, и фирма Mitsui надеется, что применение втулок из этого материала в будущем позволит предпринять дальнейшее повышение максимального давления сгорания.



Рис. 7. Износ цилиндровой втулки И поршневого кольца, измеренный на лабораторном стенде. Материал цилиндровой втулки: А - таркэллой; Б -чугун «червеобразным» графитом без присадок; В - то же с присадкой бора; Г - то же с присадками бора и фосфора.

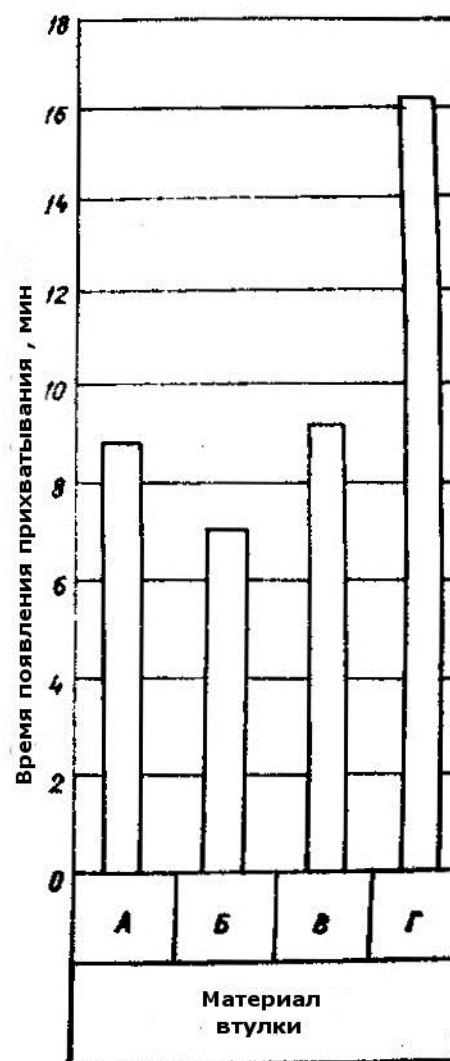


Рис. 8. Время появления прихвата поршневых колец к цилиндровой втулке.

Фирма Mitsui провела также эксперименты с двухслойными цилиндрическими втулками, у которых внутренний слой изготовлен из Материала с высокой износостойкостью (таркэллой), а наружный - из материала с высокой механической прочностью (чугун с шаровидным графитом). Испытания опытовой двухслойной втулки показали, что временное сопротивление разрыву составляет 490,3 МПа для наружного слоя, 274,6 МПа для срединного слоя и 205,9 МПа для внутреннего слоя, а усталостная прочность наружного слоя, равная 225,5 МПа, в два раза превышает усталостную прочность внутреннего слоя.

Фирма Mitsui изготовила 32 двухслойные цилиндрические втулки из указанных материалов и оборудовала ими дизели K74EF на нескольких судах. Первое из этих судов работало большую часть своего ходового времени с нагрузками, равными максимальной длительной мощности или близкими к ней, что создавало весьма напряженные условия работы для экспериментальных втулок. Сообщений о неудовлетворительной работе втулок, их повреждении или чрезмерном износе не поступало, что позволяет фирме считать результаты испытаний положительными. Тем не менее, фирма Mitsui считает, что двухслойные цилиндрические втулки могут получить распространение лишь в том случае, если будут найдены пути снижения высокой стоимости их изготовления.

При изготовлении четырехтактных двигателей малой мощности широкое распространение получило покрытие защитными слоями, а также азотирование рабочей поверхности цилиндрических втулок для повышения их износостойкости. Наиболее широко известны хромовые и никелевые диспергированные покрытия, наносимые с помощью средств гальванотехники. Хромирование цилиндрических втулок применяется иногда и в больших двухтактных двигателях при восстановлении изношенных втулок. Фирма MAN-B&W решила проверить целесообразность применения этого метода на новых втулках. С этой целью были проведены натурные испытания на нескольких двухтактных дизелях выпуска прежних лет. Эти испытания не показали какого-либо заметного снижения износа. Испытания были прекращены, и хромирование цилиндрических втулок для новых двухтактных дизелей фирмой не применяется.

Фирмой MAN-B&W было также испытано применение никелевых покрытий цилиндрических втулок в двухтактных дизелях с петлевой продувкой. С этой целью был сконструирован опытовый четырехцилиндровый двухтактный дизель с диаметром цилиндра 230 мм, ходом поршня 340 мм и цилиндрической мощностью 112 кВт/цил. Поршневые кольца были изготовлены из легированного серого чугуна без покрытий.

Испытания показали, что износостойкость цилиндрических втулок с никелевым покрытием намного выше, чем втулок без покрытия. Тогда фирма решила провести аналогичные испытания на дизеле с диаметром цилиндров 520 мм. Несколько цилиндрических втулок были покрыты слоем никелевого сплава никасила толщиной 1 мм; поршневые кольца были изготовлены из традиционного материала без каких-либо покрытий. Испытания дали отрицательный результат. Во втулках с покрытием наблюдался повышенный абразивный износ с вырыванием частиц карбида кремния из основного материала втулки. Замена прежних поршневых колец кольцами с плазменным покрытием, а также увеличение подачи смазочного масла не дали заметного улучшения. Испытания были прекращены, и в дальнейшем никелевое покрытие рабочих поверхностей цилиндрических втулок в двухтактных дизелях фирмой не применялось. Азотирование рабочей поверхности является традиционным методом обработки цилиндрических втулок для четырехтактных ДВС, с помощью которого рабочей поверхности придается высокая твердость и износостойкость. Глубина слоя азотирования составляет от 6 до 12 мкм, под ним располагается связующий переходной слой, твердость которого по мере увеличения глубины до 0,1 - 0,3 мм постепенно снижается до твердости основного материала. Для двухтактных дизелей с большим диаметром цилиндров азотирование не нашло распространения ввиду невозможности получить азотированный слой достаточной глубины.

В последние годы ведущие изготовители двухтактных дизелей начали проводить работы по применению лазерного упрочнения рабочей поверхности цилиндрических втулок. Так, швейцарская фирма Sulzer в сотрудничестве с федеральным институтом технологии провела предварительное изучение возможностей лазерной обработки поверхностей. Отмечается, что лазерная обработка есть вид термической обработки, отличием которого является местный нагрев небольшого участка обрабатываемой поверхности до очень высокой температуры, тогда как температура окружающих участков поверхности повышается незначительно. Источником тепла является узкий лазерный луч, фокусируемый на поверхности изделия, которое во время обработки перемещают с определенной скоростью - перпендикулярно направлению луча. Если требуется обработать поверхность на ширину, превышающую диаметр фокусного пятна луча, это перемещение делают в несколько проходов (рисунок 9). Основными факторами, определяющими степень нагрева обрабатываемого участка поверхности, являются интенсивность лазерного луча и коэффициент поглощения материала поверхности.

Коэффициент поглощения для данного материала, в свою очередь, определяется состоянием поверхности и длиной волны лазерного излучения. Для металлов коэффициент поглощения высок при малых длинах волны и быстро уменьшается с увеличением длины волны. Для непроводниковых материалов (например, керамики) коэффициент поглощения имеет максимумы для одних диапазонов длины волны и минимумы для других (рис. 10) [8, 10, 11].

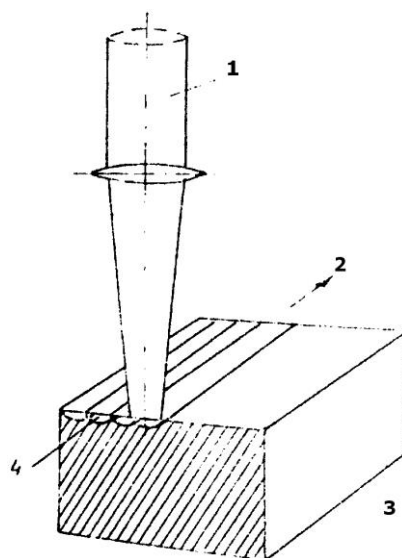


Рис. 9. Схема процесса лазерной обработки поверхности: 1 - лазерный луч; 2 - направление движения изделия; 3 - обрабатываемое изделие; 4 - зона обработки поверхности.



Рис. 10. График зависимости коэффициента поглощения от длины волны лазерного излучения для меди (1) и сапфира (2) при идеальном состоянии поверхности: а - криптоно-фторный лазер с максимальной мощностью 159 кВт и длиной волны излучения 248 нм; б - лазер на двуокиси углерода с максимальной мощностью 15 кВт и длиной волны излучения 10,60 мкм.

Лазеры для обработки поверхности должны иметь достаточно высокую мощность. Фирма Sulzer отмечает, что из ~30 различных типов лазеров, имеющихся в настоящее время на рынке, для обработки поверхности могут использоваться, по существу, только лазеры по двуокиси углерода, мощность которых достигает 15 кВт. С помощью этих лазеров может быть получена концентрация энергии в фокусном пятне на обрабатываемой поверхности от 100 Вт/см² до 10 МВт/см² в зависимости от мощности лазера, качества луча и фокусирующей оптики. Качество лазерного луча определяется равномерностью распределения интенсивностью по поперечному сечению луча. Для обработки поверхности наиболее желательно применение такой оптики, которая формирует лазерный луч прямоугольного сечения с равномерным распределением интенсивности.

По мнению фирмы Sulzer, наиболее подходящим способом лазерного упрочнения рабочей поверхности цилиндрических втулок, кольцевых канавок поршней и других деталей дизеля является такое проведение технологического процесса, при котором происходит мартенситная закалка поверхностного слоя детали. В этом процессе поверхность детали нагревается лазерным лучом до температуры ниже точки плавления материала. Время воздействия лазерного луча выбирается в пределах от 0,1 до 1 с, а диаметр фокусного пятна - от 2 до 20 мм. Обычно обрабатываемую поверхность предварительно покрывают абсорбентным слоем (например, коллоидным графитом), благодаря чему коэффициент поглощения повышается до 60-80%. Это способствует получению высоких скоростей нагрева, составляющих от 1000 до 10000 К/с. При таком быстром нагреве после достижения температуры точки 1 (рис. 11) в поверхностном слое детали происходит преобразование начальной перлитно-ферритной структуры материала в аустенитную. Температура основного материала в зоне обработки вследствие короткого времени действия лазерного луча не успевает повыситься более 50-200 °С, и эта зона служит хорошим охладителем после окончания действия луча. Охлаждение поверхностного слоя идет со скоростью от 1000 до 5000 К/С. При этом происходит преобразование аустенитной структуры в мелкозернистый мартенсит, обладающий очень высокой твердостью. По окончании процесса лазерной мартенситной закалки с поверхности детали удаляют легкий налет окислов, образовавшийся во время процесса, и нанесенный в начале процесса абсорбентный слой.

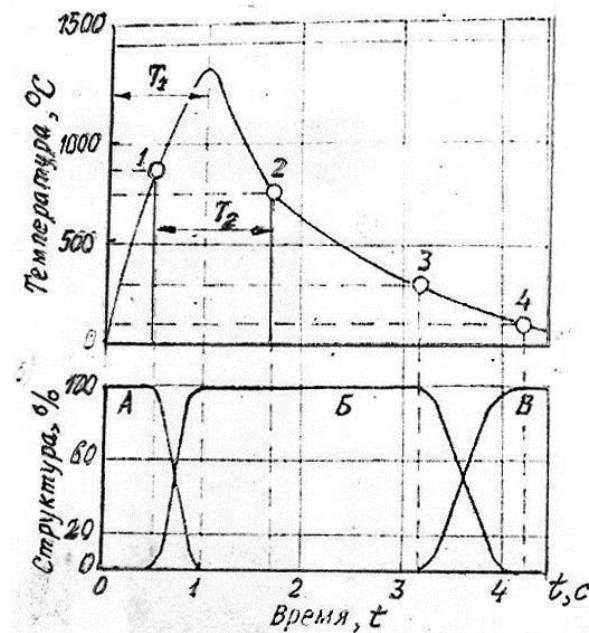


Рис. 11: а - График изменения температуры обрабатываемой поверхности во времени; б - изменение структуры поверхностного слоя изделия, %, но по объему; А - перлитно-ферритная структура; Б - аустенит; В - мартенсит; T_1 - продолжительность воздействия лазерного луча; T_2 - время, в течение которого сохраняется устойчивый процесс преобразования; 1 - температура преобразования перлитно-феррита в аустенит при быстром нагреве; 2 - температура устойчивого преобразования перлитно-феррита в аустенит; 3 - температура начала образования мартенситной структуры; 4 - температура исчезновения аустенитной структуры.

Недостатком описанного технологического процесса является трудность получения гомогенного поверхностного слоя при образовании больших площадей. В этом случае обработка производится в несколько проходов, при каждом из которых образовывается полоска шириной, равной диаметру фокусного пятна. Полоски перекрывают друг друга, и поэтому во время прохода очередной полоски происходит отпуск материала на границе предыдущей полоски. Поэтому следует стремиться к тому, чтобы перекрытие полосок было возможно меньшим.

Другой отличается тем, что нагрев поверхностного слоя происходит до более высоких температур, превышающих температуру плавления, т. е. происходит переплавка поверхностного слоя. После прекращения действия лазерного луча поверхностный слой изделия быстро охлаждается и затвердевает, и в нем происходит образование мелкозернистых структур с высокой твердостью и износостойкостью. При таком способе

обработки изделий из инструментальной стали на поверхности изделия образуется структура, состоящая из метастабильного аустенита и углерода. При обработке изделий из чугуна на поверхности образуется ледебуритная структура, обладающая высокой износостойкостью. Фирма Sulzer считает, что этот вид лазерной обработки найдет применение и в тех случаях, когда необходимо обеспечить высокую коррозионную стойкость поверхности изделия.

Фирмой MAN-B&W проведена обширные экспериментальные исследования по лазерному упрочнению цилиндрических втулок и поршневых колец. Начальные испытания проводились в лабораторных условиях и были направлены на отработку технологии лазерной обработки поверхностей. Вместо стандартной оптической системы, обычно поставляемой в комплекте с лазером, по заказу фирмы Фирмой MAN-B&W были изготовлены специальные линзы чечевицеобразной формы, образующие луч прямоугольного сечения с равномерным распределением интенсивности по всему сечению. Проверялось воздействие лазерной обработки на изделия из различных материалов. Так, было испытано шесть видов серого чугуна, применяемых для изготовления цилиндрических втулок: легированного и низколегированного, с добавкой и без добавки фосфора и др. Установлено, что два вида чугуна хорошо поддаются лазерной обработке поверхности. Испытания на опытовом двигателе показали, что поршневые кольца из традиционных материалов при работе в упрочненных лазерной обработкой цилиндрических втулках имеют идентичный или меньший износ, чем во втулках, не подвергнутых лазерному упрочнению.

Дальнейшие испытания проводились на большой группе четырехтактных и двухтактных дизелей с диаметрами цилиндров от 230 до 700 мм на испытательных стендах и в условиях эксплуатации на объектах. Фирма MAN-B&W, исходя из своего опыта, считает, что в исследованиях можно базироваться только на натурных испытаниях. Результаты, полученные на специальных лабораторных стендах без двигателей, часто приводят к ошибочным выводам. Более того, не всегда результаты, полученные на двигателях с меньшим диаметром цилиндров, могут быть перенесены на двигатели с большим диаметром.

При проведении стендовых испытаний двигателей производились измерения износа цилиндрических втулок в районе ВМТ верхнего поршневого кольца и по образующей цилиндра. Применилась специальная малогабаритная аппаратура, в том числе с использованием радиоактивных изотопов. Всего было испытано 37 цилиндрических втулок с

рабочей поверхностью, подвергнутой лазерному упрочнению, при продолжительности испытаний 6000 ч. Установлено, что как абразивный, так и коррозионный износ этих втулок намного меньше, чем втулок без обработки рабочей поверхности, а также азотированных. К тому же износ упрочненных цилиндрических втулок и работающих поршневых колец отличался большей равномерностью по окружности. Испытания в условиях эксплуатации после 1000 ч работы и более подтвердили результаты стендовых испытаний. Ни на одной из испытываемых втулок с рабочей поверхностью, подвергнутой лазерному упрочнению, не было обнаружено трещин.

Дополнительные эксперименты по применению цилиндрических втулок с лазерным упрочнением на двигателях фирмы Фирмой MAN-B&W выполнила фирма Mitsui. Испытания, проведенные в лаборатории с цилиндрическими втулками из таркэллоя, показали, что рабочая поверхность втулки после лазерного упрочнения приобретает мартенситную структуру без нарушения первоначальной формы графита. При этом твердость поверхности увеличивается до 700 ед. по Виккерсу на глубину до 1 мм, а скорость износа уменьшается на 40% по сравнению со втулкой без упрочнения. Отмечено также, что деформация и остаточные напряжения в упрочненном материале очень малы. Фирма Mitsui установила две цилиндрические втулки с лазерным упрочнением на дизеле L35MC, находящемся в эксплуатации. После первых 3000ч работы этих втулок никаких замечаний нет.

Литература

1. Леонтьев Л. Б., Юзов Л. Д. Полтинники коленчатых валов судовых дизелей. - Владивосток: ДНГМЛ, 2000. - 173 с.
2. Хмелевская В. Б., Леонтьев Л. Б., Лавров Ю. Г. Технологии восстановления и упрочнения деталей судовых механизмов и триботехнические характеристики покрытий. - СПб.: СПГУВК, 2002. - 309 с.
3. Хмелевская В. Б., Леонтьев Л. Б. Повышение надежности судового оборудования технологическими методами. Т. I. Современные методы восстановления и упрочнения деталей. - Владивосток: МГУ. Дальнаука, 2003. - 283 с.
4. Хмелевская В. Б., Леонтьев Л. Б. Повышение надежности судового оборудования технологическими методами. Т. 3. Восстановление и упрочнение деталей. - Владивосток: МГУ. Дальнаука, 2003. - 356 с.

5. Леонтьев А. Л. Повышение надежности прецизионных деталей топливной аппаратуры судовых дизелей технологическими методами / Леонтьев Л. Б., Леонтьев А. Л. // Судостроение №3, 2011, с. 40-41.
6. Леонтьев А. Л. Формирование износостойких покрытий на прецизионных узлах трения / Леонтьев Л. Б., Шапкин Н. П., Леонтьев А. Л. // Металлообработка №3, 2011, с. 14-17.
7. Леонтьев А. Л. Системное проектирование технологического процесса формирования износостойких покрытий / Леонтьев Л. Б., Леонтьев А. Л. // Металлообработка № 1, 2012. с. 48-52.
8. Матвеев Ю. И., Прохоров И. И., Репин Ф. Ф. Лазерная обработка деталей судовых машин // Сб. докладов / «Проблемы машиноведения». Нф ИМАШ РАН. 1997. С. 73.
9. Матвеев Ю. И., Березин Е. К., Корнев А. Б. Плазменное упрочнение защитных втулок нефтеперекачивающих насосов // Сб. докладов «Проблемы машиноведения» / Нф ИМАШ РАН. 1997. СПб. С. 116.
10. Матвеев Ю. И., Ефремов С. Ю., Мордвинкин П. П. Лазерная обработка цилиндрических втулок среднеоборотных дизелей // Сб. докладов «Упрочнение и восстановление деталей машин» / НГСА. 1998, С. 7-8.
11. Матвеев Ю. И., Ефремов С. Ю. Упрочнение поршневых алюминиевых сплавов лазерной обработкой // Сб. докладов «Упрочнение и восстановление деталей машин» / НГСА. 1998. С. 11-13.