

## **Вкладыши ДЗВ – надежность, долговечность, прочность**

Вкладыш подшипника скольжения является критической деталью двигателя внутреннего сгорания т.е. функционирование двигателя напрямую связано с качеством вкладыша, а отказ в его работе неминуемо приводит к аварийной остановке и дорогостоящему ремонту.

Чаще всего преждевременный выход из строя подшипников скольжения связан с особенностями материалов, из которых он изготовлен. Вкладыши, произведенные разными компаниями-изготовителями, могут внешне выглядеть одинаковыми и иметь размеры, соответствующие чертежу. Однако уровень надежности их работы в двигателе в значительной мере зависит от типа и параметров микроструктуры материалов, из которых они изготовлены.

С середины 70-х годов прошлого века, т.е. в течение почти сорока лет Димитровградский завод производит вкладыши подшипников скольжения для тяжелонагруженных двигателей внутреннего сгорания.

За это время за продукцией завода закрепилась прочная репутация высокого качества и надежности. Такой результат стал возможен только благодаря сочетанию совершенной системы обеспечения качества с высоким технологическим уровнем производства.

*Триметаллические вкладыши ДЗВ производятся по технологии, используемой только ведущими мировыми производителями подшипников скольжения. Ни один другой завод на территории СНГ не обладает подобной технологией.*

В чем же преимущество технологии ДЗВ перед другими известными технологиями?

Прежде всего в процессах производства материалов, формирующих триметаллическую структуру вкладыша.

Для того, чтобы разобраться в этих преимуществах, необходимо понять, каковы основные характеристики материала вкладыша, необходимые для его надежной работы.

### **1. Характеристики материалов подшипников скольжения**

Преимущества и недостатки различных подшипниковых материалов проявляются в их влиянии на основные эксплуатационные свойства вкладышей:

- **Усталостная прочность** - максимальная величина циклической нагрузки, при которой вкладыш может работать неограниченное время без образования трещин усталостного разрушения.

В двигателях внутреннего сгорания энергия горящего топлива превращается в возвратно-поступательное движение поршня, который посредством шатуна вращает коленчатый вал. Работа двигателя происходит циклически: выпуск-сжатие-рабочий ход-выпуск. За один цикл (два полных оборота вала) давление в цилиндре повышается до пикового значения в начальный период рабочего хода и затем падает до уровня, близкого к атмосферному при выпуске.

В соответствии с изменениями давления меняется и нагрузка на подшипники, передаваемая шатуном. Таким образом, материал вкладыша функционирует в условиях циклического (переменного) нагружения.

Известно, что металлы в условиях переменной нагрузки разрушаются при напряжениях, существенно меньших их статического предела прочности. Это явление называется усталостью материала.

Усталостное разрушение рабочего слоя вкладыша – одна из основных причин отказа подшипников. Микроструктура материала, наличие дефектов (пор, микро-трещин) и внутренних напряжения решающим образом влияют на величину его усталостной прочности.

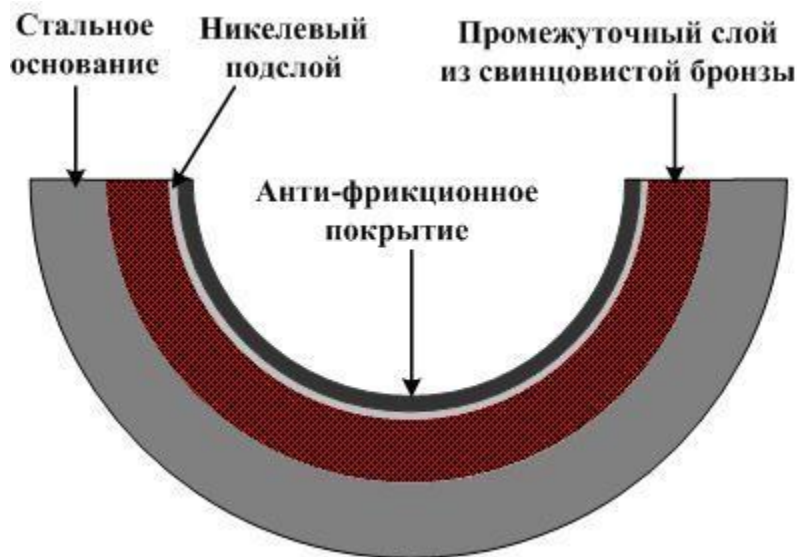
- **Износостойкость** – способность материала подшипника сопротивляться износу т.е. изменению размеров, формы и массы вследствие трения.  
В двигателях внутреннего сгорания подшипники скольжения работают преимущественно в гидродинамическом режиме, при котором поверхности вкладыша и шейки вала разделены масляной пленкой. Масляный слой предотвращает прямой металлический контакт и также способствует более равномерному распределению нагрузки по рабочей поверхности вкладыша. Однако полностью избежать металлического контакта невозможно. Особенно это касается тяжело нагруженных двигателей, в которых толщина масляной пленки может быть меньше уровня шероховатости трущихся поверхностей. Другой причиной прямого контакта может стать непараллельность поверхностей, вызванная дефектами шлифовки вала или несоосностью.  
Износ рабочей поверхности вкладыша может быть также результатом абразивного воздействия чужеродных частиц в масле.
- **Анти-фрикционные свойства** характеризуют способность материала снижать эффект трения с валом: уменьшать коэффициент трения, сопротивляться схватыванию с материалом вала (задиру), быстро прирабатываться и быть способным поглощать чужеродные включения, находящиеся в масле.  
Свинец, будучи очень мягким и пластичным металлом, наилучшим образом сочетает все анти-фрикционные свойства. Именно поэтому анти-фрикционные покрытия три-металлических вкладышей делаются из свинцовистых сплавов.

*Итак, материалы вкладыша подшипника скольжения должны обладать высокой усталостной прочностью и износостойкостью. В то же время его поверхность должна быть мягкой для обеспечения необходимого уровня анти-фрикционных свойств.*

## **2. Триметаллический вкладыш**

Наилучшим сочетанием всех требуемых характеристик подшипникового материала обладает триметаллический вкладыш на основе свинцовистой бронзы.

Конструкция триметаллического вкладыша представлена на рис.1.



**Рис.1 Триметаллический вкладыш**

- **Стальное основание** обеспечивает жесткость, натяг и плотное прилегание вкладыша к поверхности постели, сохраняющиеся при повышенных температурах и под воздействием радиальных и тангенциальных сил.
- **Промежуточный слой** служит подложкой для анти-фрикционного покрытия. Промежуточный слой, как правило, изготавливается из свинцовой бронзы и должен обладать анти-фрикционными свойствами, необходимыми для предотвращения задира в местах локального износа анти-фрикционного покрытия. В то же время промежуточный слой должен быть достаточно прочным, чтобы выдерживать циклические нагрузки без риска образования усталостных трещин. Свинец, благодаря своим высоким анти-фрикционным свойствам, является неотъемлемым компонентом бронз, используемых для формирования промежуточного слоя. Содержание свинца в бронзе может достигать до 25%.
- **Никелевый подслой** толщиной 1-2 микрона наносится на поверхность промежуточного слоя непосредственно перед нанесением анти-фрикционного покрытия. Подслой никеля служит барьером, предотвращающим диффузию олова из материала покрытия в бронзу промежуточного слоя. В отсутствие никелевого диффузионного барьера содержание олова в свинцовом сплаве покрытия постепенно уменьшится, что может привести к снижению его коррозионной стойкости. Кроме того, никелевый подслой предотвращает образование хрупкого интерметаллического слоя соединения олова и меди на поверхности бронзы.
- **Анти-фрикционное покрытие** обеспечивает анти-фрикционные свойства: низкий коэффициент трения, задиростойкость, прирабатываемость и способность поглощать твердые включения в масле. Как правило анти-фрикционные покрытия производятся из свинцового сплава, легированного оловом и медью. Олово

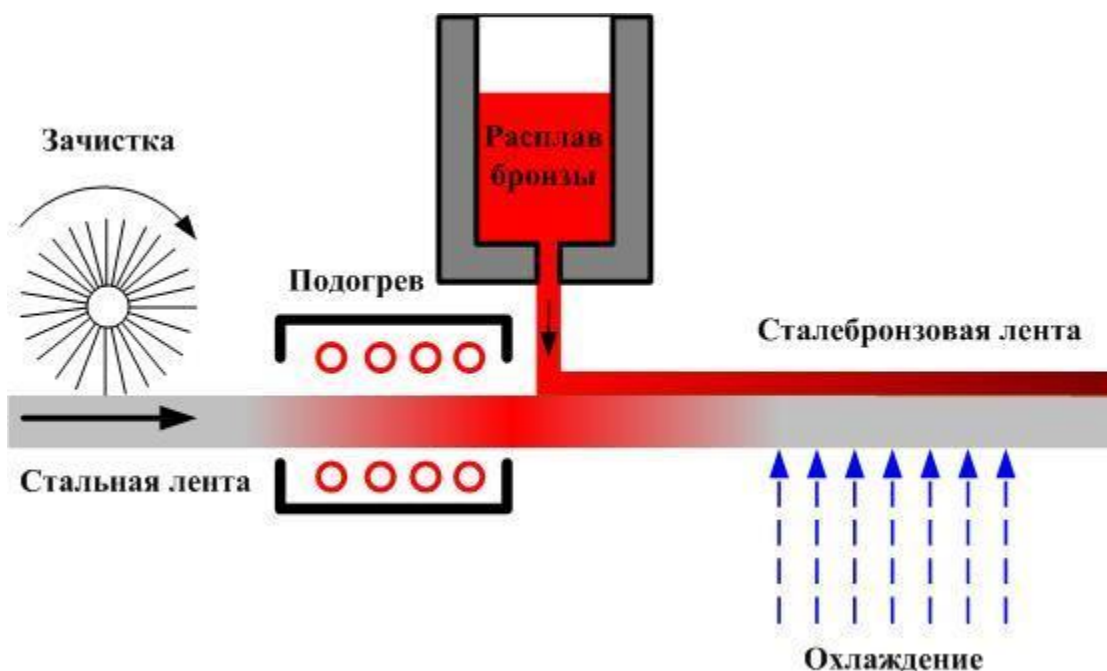
защищает свинцовистый сплав от коррозии в окисленном масле. Медь повышает прочность и износостойкость покрытия.

*Только сбалансированность свойств, состава и толщин слоев триметаллического вкладыша гарантирует высокий уровень его эксплуатационных свойств.*

### 3. Технология производства литой сталебронзовой ленты на ДЗВ

Характеристики и особенности сталебронзовой ленты в решающей мере определяют прочность и анти-фрикционные свойства вкладышей, из нее изготовленных.

В ДЗВ сталебронзовая лента производится по технологии непрерывного литья, схематично изображенной на рис.2.

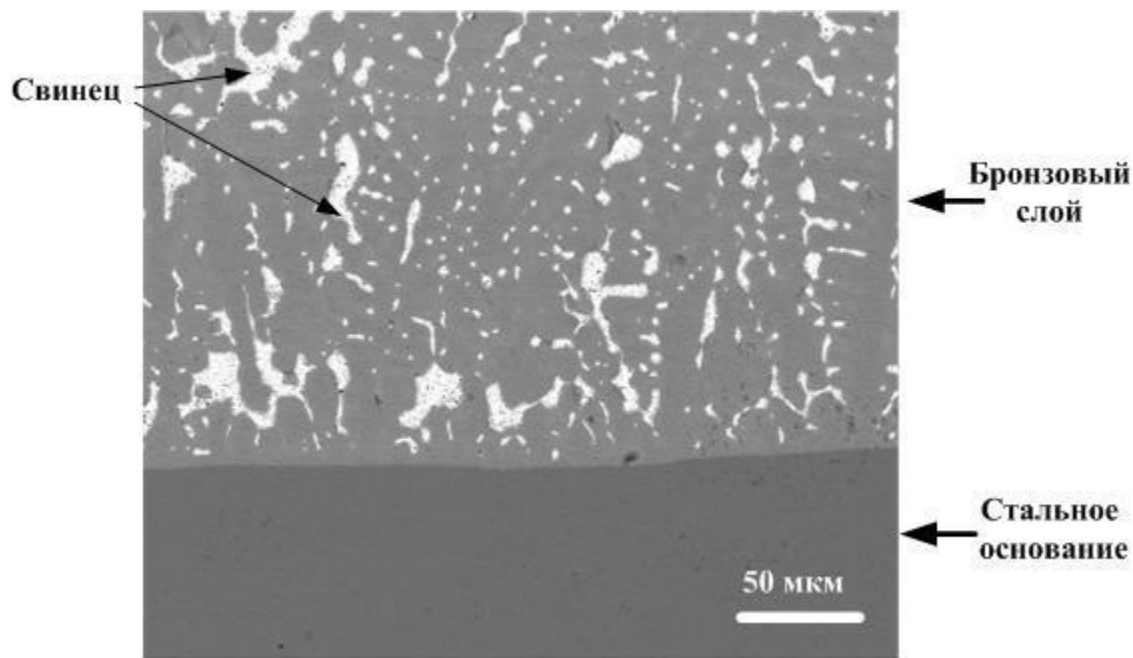


**Рис.2** Схема процесса производства литой сталебронзовой ленты (ДЗВ)

В этом процессе стальная полоса вначале обезжиривается и зачищается абразивной лентой. После зачистки полоса подогревается в восстановительной атмосфере и входит в зону литья, где бронзовый расплав через специальный питатель поступает на зачищенную поверхность стали. В зоне охлаждения тепло расплава отводится вертикально вниз через стальную полосу.

Направление теплоотвода и его интенсивность исключительно важны для формирования требуемой столбчатой структуры бронзы с кристаллитами перпендикулярными поверхности раздела сталь-бронза.

Фотография типичной микроструктуры литой сталебронзовой ленты ДЗВ представлена на рис.3.



**Рис.3 Микроструктура литой сталебронзовой ленты  
(сканирующий электронный микроскоп)**

На фото отчетливо видна вертикальная направленность (столбчатость) структуры бронзы, представляющей собой дендритные кристаллиты, между ветвями которых находятся включения свинца.

Поверхность раздела сталь-бронза не имеет дефектов и не содержит свинцовых включений, что гарантирует прочную адгезию слоев стали и бронзы.

#### **Функциональные характеристики литой структуры:**

- Столбчатые кристаллиты меди обеспечивают усталостную прочность - сопротивляемость бронзового слоя циклическим нагрузкам, направленным перпендикулярно поверхности вкладыша.
- Свинец, заполняющий пространство между ветвями дендритов, придает бронзе анти-фрикционные свойства, “смазывая” её поверхность при прямом трении с поверхностью вала.
- Прочная адгезия со сталью, сформировавшаяся при температуре литья (выше 1000 °С) предотвращает отслоение бронзового слоя при высоких нагрузках на вкладыш во время его эксплуатации.

*Таким образом, структура сталебронзового материала, произведенного по литейной технологии, гарантирует максимально высокую прочность в сочетании с хорошими антифрикционными свойствами.*

*Кроме ДЗВ, единственного на территории СНГ, только еще четыре ведущих мировых производителей вкладышей подшипников скольжения обладают подобной технологией.*

Остальные компании используют для получения сталебронзовой ленты альтернативные методы, прежде всего - порошковую технологию.

#### **4. Альтернативные процессы производства сталебронзовой ленты и их недостатки**

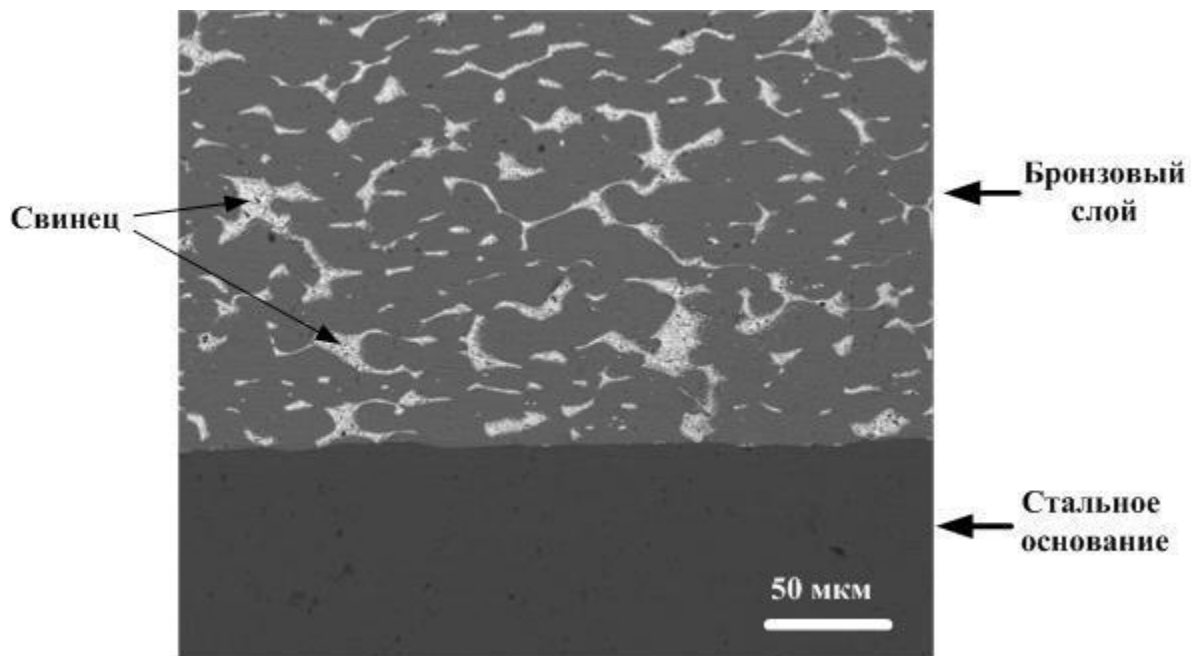
- **Производство сталебронзовой ленты методом спекания**

Наиболее распространенной альтернативой литейной технологии является процесс производства сталебронзовой ленты методом порошковой металлургии (спекания). Этот процесс популярен среди компаний, производящих вкладыши для средненагруженных двигателей.

В процессе производства спеченной бронзы на предварительно обезжиренную и зачищенную поверхность стали насыпается порошок бронзы, после чего лента входит в длинную муфельную печь спекания. В печи создается восстановительная атмосфера, способствующая разложению окисной пленки, покрывающей поверхность частиц порошка.

По выходе из печи лента со спеченной пористой бронзой подвергается компактизации на прокатном стане, после чего процесс спекания и прокатки повторяется.

Как видно на фото (рис.4) микроструктура спеченной бронзы состоит из округлых кристаллитов меди, окруженных свинцом.



**Рис.4 Микроструктура спеченной сталебронзовой ленты (сканирующий электронный микроскоп)**

В отличие от литой столбчатой структуры спеченная бронза в меньшей степени способна сопротивляться нагрузкам. Кроме того, спеченная бронза часто содержит незакрытые поры, дополнительно снижающие ее усталостную прочность.

По данным английской фирмы Glacier усталостная прочность спеченной бронзы на 20% ниже, чем у литой. Именно поэтому вкладыши, предназначенные для эксплуатации при экстремально высоких нагрузках (например в дизельных двигателях с непосредственным впрыском топлива), всеми ведущими компаниями в мире изготавливаются только из литой сталебронзовой ленты.

- **Производство сталебронзовой ленты методом плакирования**

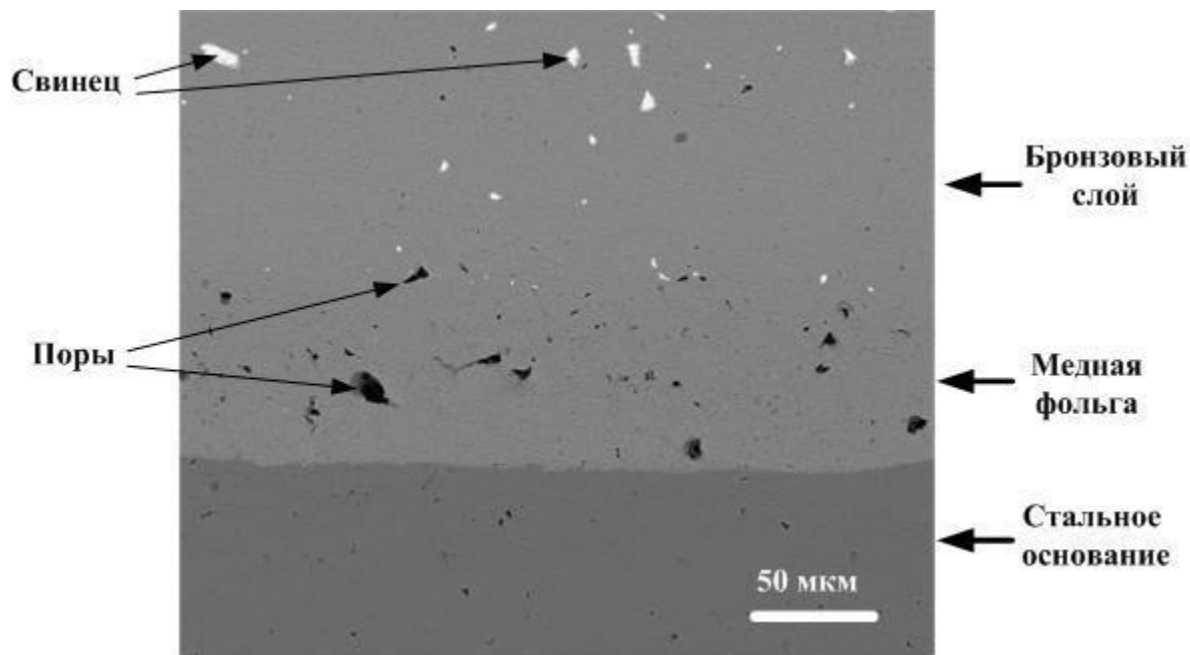
Еще одной альтернативной технологией является процесс получения сталебронзовой ленты методом холодной прокатки (плакирования).

Этот процесс заключается в совместной прокатке двух обезжиренных и зачищенных лент стали и бронзы с обжатием около 60%. Бронзовая лента предварительно плакируется с обеих сторон медной фольгой для обеспечения адгезии со сталью.

После совместной прокатки сталебронзовая лента отжигается в печи в восстановительной атмосфере для снятия внутренних напряжений.

После отжига лента прокатывается на окончательный размер.

На приведенной ниже фотографии представлена микроструктура ленты, полученной методом холодной прокатки.



**Рис.5 Микроструктура плакированной сталебронзовой ленты (сканирующий электронный микроскоп)**

Совершенно очевидны два недостатка представленной микроструктуры: дефекты в виде пор в слое медной фольги и очень низкое содержание свинца в бронзе. Поры несомненно снижают надежность и усталостную прочность вкладышей, изготовленных из такой ленты.

Что касается содержания свинца в бронзе, то оно составляет всего 2.5%, что примерно в 10 раз ниже концентрации, необходимой для надежного функционирования триметаллических вкладышей. Анти-фрикционные свойства такой бронзы очень низки, и при возникновении металлического контакта с материалом вала создаются условия для задира и схватывания.

## **5. Покрытия триметаллического вкладыша ДЗВ**

Основная функция покрытия триметаллического вкладыша заключается в обеспечении антифрикционных свойств в условиях прямого металлического контакта с поверхностью вала.

Покрытие играет роль твердой смазки, снижающей коэффициент трения, обеспечивающей прирабатываемость вкладыша, предотвращающей задиры и абсорбирующей чужеродные частицы, циркулирующие с маслом. В этом смысле, чем мягче покрытие, тем в лучшей мере оно выполняет эти функции.

- **Гальваническое покрытие из свинцовистого сплава**

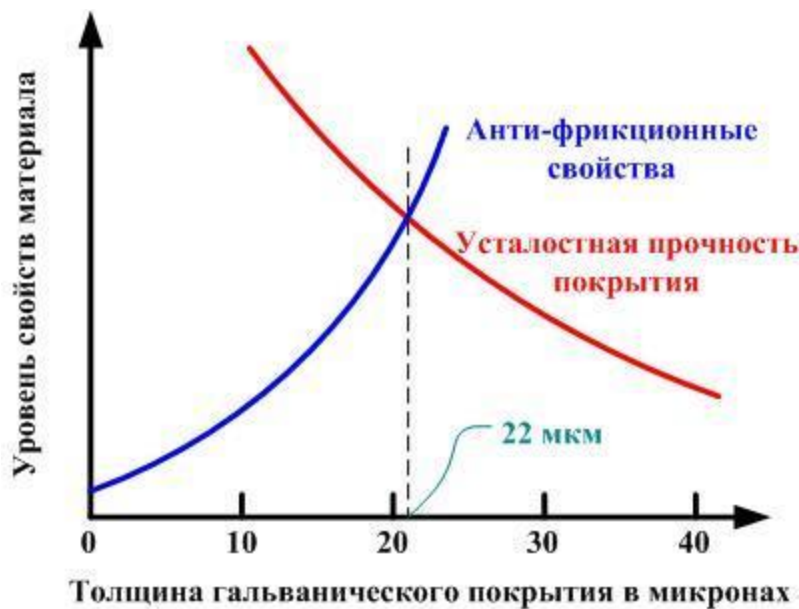
С точки зрения антифрикционных свойств из всех металлов свинец как нельзя лучше подходит в качестве материала покрытия. Однако нельзя забывать, что покрытие должно противостоять ударным нагрузкам и износу, т.е. быть достаточно прочным.

Для повышения твердости и усталостной прочности свинец легируется медью в небольших концентрациях. Покрытие вкладышей ДЗВ содержит 2-3% меди. Другая легирующая добавка - олово (8-12%), подавляющее коррозию свинцовистого сплава в окисленном масле.

Помимо химического состава, очень важным параметром покрытия является его толщина. С одной стороны, толстое покрытие в большей степени обеспечивает антифрикционные свойства. Однако повышение толщины покрытия отрицательно сказывается на величине его усталостной прочности. Оптимальное значение толщины зависит от минимально допустимой величины ударной прочности и уровня антифрикционных свойств, требуемых для конкретного вкладыша.

На приведенной ниже диаграмме показано, каким образом определяется оптимальная толщина покрытия для вкладышей ДЗВ, предназначенных для эксплуатации в тяжело нагруженных двигателях КАМАЗ.





**Рис.6 Оптимизация толщины гальванического покрытия**

Как видно из графика, с ростом толщины покрытия его усталостная прочность падает, а анти-фрикционные свойства улучшаются. Наилучшее сочетание эксплуатационных свойств вкладыша для данного типа двигателей достигается при толщине покрытия 22 мкм. Несоответствие толщины покрытия оптимальной величине снижает надежность и долговечность вкладыша и двигателя в целом. Слишком тонкое покрытие приводит к преждевременному износу и возможному задиру. Покрытия с толщиной, превышающей оптимальное значение, склонны к разрушению в результате усталости.

Как анти-фрикционное покрытие, так и никелевый подслои наносятся на поверхность вкладышей ДЗВ гальваническим методом на высокопроизводительных автоматических линиях электролитических покрытий.

*Таким образом, химический состав и толщина гальванического свинцовистого покрытия вкладышей ДЗВ тщательно сбалансированы, что обеспечивает оптимальное сочетание прочности, износостойкости и анти-фрикционных свойств.*

- **Покрытие ПВД из сплава алюминий-олово**

Последние инженерные разработки в области конструирования двигателей внутреннего сгорания выдвигают новые требования к подшипниковым материалам. В первую очередь это касается повышения уровня необходимой усталостной прочности. В современных дизельных двигателях с турбонаддувом и системой топливоподачи типа "Common Rail" давление в цилиндрах превышает 200 атм. Соответственно велика и нагрузка на вкладыши, как шатунные, так и коренные. Давление на верхние шатунные и иногда на нижние коренные вкладыши в таких двигателях превышает предел усталостной прочности относительно мягкого покрытия из свинцовистого сплава, составляющий около 60 МПа.

Для двигателей такого типа необходимы вкладыши, имеющие значительно более прочное покрытие с пределом усталостной прочности порядка 120 МПа.

Для создания покрытий такого уровня прочности используется метод напыления из газовой фазы (ПВД). Покрытие ПВД (на западе используется термин sputter/спаттер) наносится отдельными атомами или небольшими кластерами атомов, выбиваемыми положительными ионами аргонной плазмы из материала катода (мишени) в пространстве вакуумной камеры.

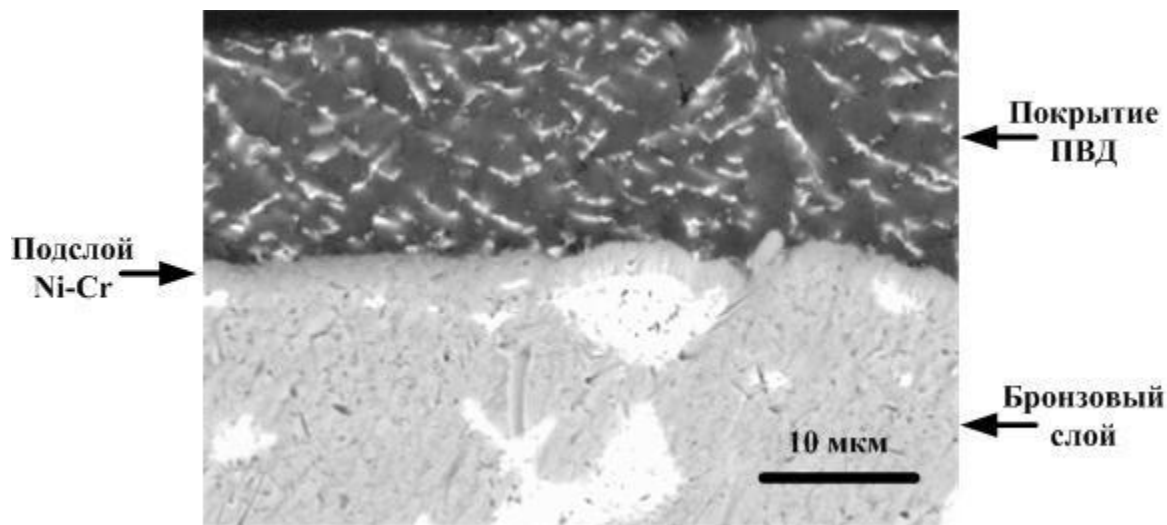
Вкладыши с покрытием ПВД изготавливаются только из литой сталебронзовой ленты, поскольку только ее структура обеспечивает необходимый уровень усталостной прочности.

Вначале наносится подслоя (диффузионный барьер) из сплава никель-хром, после чего наносится само покрытие, представляющее собой сплав алюминий-олово.

Метод нанесения покрытия позволяет сформировать сплав твердостью порядка 100 НV, что почти на порядок выше твердости гальванического свинцовистого покрытия.

Покрытие ПВД содержит 20% олова для придания сплаву анти-фрикционных свойств.

Фрагмент микроструктуры три-металлического вкладыша ДЗВ с покрытием ПВД представлен на рис.7.



**Рис.7 Покрытие ПВД на вкладыше ДЗВ  
(сканирующий электронный микроскоп)**

Микроструктуру покрытия отличает мелкодисперсность, химическая однородность, бездефектность и плотное прилегание к поверхности литой бронзы вкладыша ДЗВ.

*Вкладыши ДЗВ на основе литой сталебронзовой ленты с особо прочным покрытием ПВД из сплава алюминий-олово имеют уровень усталостной прочности, необходимый для надежной работы в экстремально нагруженных дизельных двигателях с турбонаддувом и системой топливоподачи типа "Common Rail".*

## **6. Заключение**

- **Материалы вкладыша подшипника скольжения должны обладать высокой усталостной прочностью и износостойкостью. В то же время его поверхность должна быть мягкой для обеспечения необходимого уровня анти-фрикционных свойств.**
- **Структура сталебронзового материала, произведенного по литейной технологии ДЗВ, в отличие от альтернативных технологий (спекания и плакирования), гарантирует максимально высокую прочность в сочетании с хорошими антифрикционными свойствами.**
- **Химический состав и толщина гальванического свинцовистого покрытия вкладышей ДЗВ тщательно сбалансированы, что обеспечивает оптимальное сочетание прочности, износостойкости и анти-фрикционных свойств.**
- **Вкладыши ДЗВ с покрытием ПВД имеют уровень усталостной прочности, необходимый для надежной работы в экстремально нагруженных дизельных двигателях с турбонаддувом и непосредственным впрыском топлива.**
- **Производства триметаллических вкладышей ДЗВ находится на технологическом уровне ведущих мировых производителей подшипников скольжения. Ни один другой завод на территории СНГ не обладает подобной технологией.**