

**БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ**

---

На правах рукописи

**БОБАРИКИН Юрий Леонидович**

**РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ТОНКИХ  
ПОРШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ ПРОКАТКОЙ**

05.16.05 — Обработка металлов давлением

**Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук**

Минск 1992

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Технический прогресс неразрывно связан с дальнейшим совершенствованием и развитием эксплуатационных, технологических и других качеств материалов деталей машин и других изделий. Применение в промышленности материалов с покрытиями различных функциональных назначений дает возможность наиболее эффективно использовать материалы по их свойствам, упростить в ряде случаев технологию изготовления деталей, заменить дорогостоящие и редкие металлы менее дефицитными материалами. Кроме того, в большинстве случаев необходимо повысить долговечность деталей, конструкций и механизмов. Нанесение покрытий означает не просто улучшение эксплуатационных и других характеристик изделия, но и создание, по существу, принципиально новой композиции, обладающей не суммой свойств материалов подложки и покрытия, а качественного нового материала.

В современном производстве важное значение имеет производство полос, листов, лент, сортового проката с нанесенным на их поверхность покрытием необходимой характеристики.

В настоящее время известны различные технологические способы нанесения покрытий на длинномерные изделия. Совмещение процесса прокатки с формированием покрытия из металлических порошков на поверхности прокатываемого компактного изделия путем их совместного пластического деформирования в вальках является перспективным направлением, имеющим высокую производительность и являющимся экономичным, малоотходным и экологически более чистым процессом.

Среди различных видов проката с нанесенным покрытием большая доля приходится на полосовой и ленточный прокат. Поэтому совершенствование процесса накатки порошковых покрытий на этот вид проката или, в частности, на полосу является актуальным.

Цель работы. Разработка и исследование технологического процесса получения полосы с тонким покрытием высокой плотности из металлических порошков совместной прокаткой порошкового слоя и компактной металлической подложки, обеспечивающего высокую производительность.

Научная новизна. Теоретически обоснована и экспериментально исследована подача порошка в зону деформации, образованную поверхностями полосы и валька, газо-порошковой струей. Теоретически обоснована взаимосвязь прочности схватывания подложки с покрытием, наносимым их совместной пластической

деформацией от величины сдвиговых деформаций в зоне соединения.

Получены аналитические выражения для определения величины относительного сдвига на контактных поверхностях в процессах осадки и прокатки, а также определены условия увеличения сдвига.

Получены теоретические выражения для определения давления на вадки при накатке тонкого покрытия из порошка на полосу.

**П р а к т и ч е с к а я ц е н н о с т ь р а б о т ы .** В работе предложен технологический процесс нанесения порошковых покрытий на полосовой материал совместной прокаткой порошка и подложки, включающий подачу порошка в зону деформации между вадками газо-порошковой струей (а.с. СССР №1616736). Это позволяет вести процесс с высокой производительностью без потери качества покрытия. При этом газо-порошковая струя обеспечивает равномерное заполнение порошком клиновидного пространства между подложкой и вадком, что позволяет получать равнотолщинные покрытия.

Устройство для подачи порошка в вадки газо-порошковой струей (а.с. СССР №1650360) может быть смонтировано на любой промышленный прокатный стан и не требует специального прокатного оборудования.

Предложены также способ и устройство для нанесения порошковых покрытий на прокатываемый материал (положительное решение по заявке №4939948 от 3.01.92 г. и №4877312 от 4.01.92 г.), позволяющие интенсифицировать процесс схватывания покрытия и подложки.

Предложенные способы интенсификации сдвиговых деформаций при прокатке позволяют получать более прочное соединение покрытия с подложкой, что улучшает качество покрытия.

Определено влияние параметров газо-порошковой струи на режим прокатки и параметры покрытия. Установлена оптимальная величина шероховатости поверхности подложки в отношении ее влияния на прочность схватывания с покрытием. Определено влияние толщины покрытия, дисперсности порошка, степени деформации полосы в качестве подложки и зернистости металла полосы на прочность соединения покрытия с подложкой.

**Р е а л и з а ц и я р а б о т ы .** Результаты исследований использованы при изготовлении биметаллических подшипников скольжения, получаемых методом штамповки свертных биметаллических втулок из полосового материала, изготовленного по предложенной технологии. Результаты исследований прошли опытно-промышленное испытание на Белорусском металлургическом заводе с ожидаемым экономическим эффектом 15 000 рублей в год в ценах 1990 г.

А п р о б а ц и я р а б о т ы . Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на:

республиканской научно-технической конференции "Прогрессивные процессы обработки металлов давлением" (г.Гомель, 1989);

международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы пластической деформации металлов" (г.Варна, 1990);

всесоюзном семинаре "Порошковая металлургия и композиционные материалы" (г.Ленинград, 1990);

XVII Всесоюзной конференции по порошковой металлургии (г.Киев, 1991);

всесоюзной научно-технической конференции "Новые технологические процессы и оборудование для получения моно- и многослойных профилей и лент из порошковых, литых и пластически деформированных материалов (г.Сочи, 1991);

VI научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава ГПИ (г.Гомель, 1992);

47 научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава БПИ (г.Минск, 1991);

заседании кафедры "Обработка металлов давлением" Гомельского политехнического института (г.Гомель, 1992);

заседании кафедры "Машины и технология обработки металлов давлением" Белорусской государственной политехнической академии (г.Минск, 1992).

П у б л и к а ц и и . По теме диссертации опубликовано 10 работ.

С т р у к т у р а и о б ъ е м р а б о т ы . Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы, приложений и содержит: 118 страниц машинописного текста, 2 таблицы, 81 рисунок, 219 названий литературных источников и 5 страниц приложения.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В в е д е н и е . Содержит обоснование актуальности темы диссертации; сформулирована цель работы и основные задачи.

П е р в ы й р а з д е л включает обзор литературных данных по существующим методам получения изделий с покрытиями и задачи исследования. Среди широкого многообразия способов нанесения покрытий важное место занимает нанесение покрытий из порошка на подложку и, в частности, совместной пластической деформации порошкового материала и подложки при прокатке в вальках.

Совместная пластическая деформация порошкового слоя и металлической подложки, например, полосы, дает возможность получить слой из материала порошка, который прочно удерживается на поверхности полосы вследствие механического сцепления, адгезионных и других физико-химических процессов.

Для объяснения процесса соединения металлических частиц между собой, а также с компактной полосой во время деформации разработаны различные физико-химические гипотезы, объясняющие схватывание металлов в твердой фазе. Однако несмотря на это данные гипотезы каждая по-своему объясняет явление схватывания, часто противореча друг другу. Тем не менее существует общая точка зрения, что для осуществления соединения двух твердых тел необходимо плотный физический контакт с высоким давлением, совместное пластическое течение для обновления поверхностных слоев, содержащих окисные пленки и различного рода загрязнения, и появление окисных слоев, где и происходит схватывание.

При совместной деформации порошка и полосы при прокатке в очаге деформации между прокатными вальцами, в силу известной кинематики и динамики процесса взаимодействия поверхности вальца и деформируемой массы действуют нормальные и касательные напряжения. Нормальные напряжения обеспечивают плотный физический контакт деформируемых порошка и полосы, а касательные напряжения способствуют возникновению сдвиговых деформаций, которые и приводят к обновлению поверхностных слоев как на частицах порошка, так и на полосе.

При соединении металлов в твердой фазе помимо совместной пластической деформации на качество соединения существенное влияние оказывает ряд других факторов. Состояние контактируемых поверхностей, их предварительная обработка, действующие напряжения, температурное воздействие, окружающая среда будут определенным образом влиять на процесс, происходящий при соединении металлов в твердом состоянии. Предварительная обработка поверхностей перед покрытием применяется для удаления поверхностных загрязнений, жировых пленок, адсорбированных на поверхности газов, уменьшения окисных пленок. Несмотря на то, что при пластической деформации поверхностные слои разрушаются и выносятся при пластическом течении металла, поверхностная обработка перед соединением значительно уменьшает поверхностные загрязнения, окисную пленку, улучшая схватывание. Существует много способов поверхностной обработки, но более оптимальными и самыми наилучшими результатами качества схватывания металлов являются механические способы подготовки поверхностей.

Механические способы не только очищают наружную поверхность металлов, но и придают ей определенную шероховатость. А развитая шероховатость повышает прочность схватывания металлов за счет того, что увеличивается общая площадь контакта соединяемых металлов, повышается поверхностная энергия и улучшается механическое зацепление отдельными микровыступами шероховатости.

Большую роль при образовании соединения в твердой фазе играет величина давления в зоне контакта. Давление способствует плотному прилеганию контактируемых тел, создавая благоприятные условия для плотного прилегания и образования физического контакта. Оно способствует увеличению площади контакта, вызывая пластическую деформацию в зоне соединения, а также повышает прочность соединения в результате выделения тепловой энергии при пластическом деформировании соединяемых твердых тел и сближения материалов до расстояний межмолекулярных взаимодействий.

Термическая обработка соединяемых металлов в твердом состоянии пластической деформированием также повышает адгезию подложки с покрытием. В этом случае прочность соединения растет за счет роста под действием температуры активных центров и взаимной диффузии металлов.

При нанесении порошковых покрытий на компактное изделие их совместной прокаткой существуют некоторые особенности этого процесса. Одновременная деформация компактной подложки, или полосы, обеспечивает уплотнение порошка и схватывание его с поверхностью полосы. Формирование самого порошкового слоя на полосе в целом представляет собой процесс прокатки порошка на подложке. Отличие процесса накатки порошка на полосу для получения покрытия на поверхности этой полосы от процесса прокатки порошка на подложке с целью получения порошковой ленты состоит в том, что в первом случае создаются условия для наилучшего схватывания порошкового слоя с полосой. Повысить прочность сцепления можно за счет повышения давления прокатки и увеличения сдвиговых деформаций с целью активизации схватывания пластической деформацией, а также за счет оптимальной подготовки поверхности подложки и термообработки. Термообработка в этих случаях заключается в применении нагрева подложки и порошка в различных комбинациях. Так подложка и порошок могут нагреваться перед непосредственной совместной прокаткой, либо после холодной прокатки порошка и подложки проводится термообработка.

Качество наносимого покрытия или слоя из порошка и устойчивость самого процесса прокатки во многом зависят от стабильности и способа подачи накатываемого порошка в зону его деформации между вальками совместно с подложкой в виде длинномерного изделия.

Применяется несколько способов подачи порошка в случае его накатки на подложку. Большинство из них предусматривает подачу порошка при помощи гравитационных сил, действующих на порошок или глыбы тяжести порошка. Гравитационная подача ограничивает максимальную скорость подачи порошка и, как следствие, скорость прокатки. Это существенно снижает производительность прокатных станков. Скорость заполнения очага деформации при гравитационной подаче порошка зависит от его сыпучести. С увеличением скорости прокатки при неизменной сыпучести порошка заполнение ухудшается, что ведет к уменьшению толщины и плотности ленты. А при определенной верхней критической скорости процесс прокатки становится невозможным, так как порошок не успевает сыпаться к зоне деформации.

В этой связи вопросы принудительной подачи порошка в зону деформации для устранения недостатков гравитационной подачи приобретают особое значение.

Существующие способы принудительной подачи порошка намагничиванием поверхности валков для накатки магнитных порошков и с помощью пневматических механчехов, обеспечивающих толстые слои порошкового проката, трудно применимы для получения тонких порошковых покрытий.

Исходя из приведенного обзора и анализа известных работ сформулирована цель и соответствующие задачи в проведении следующих исследований:

1. Теоретическое обоснование способа активизации схватывания покрытия с поверхностью полосы путем совместной пластической деформации подложки и порошка.
2. Проведение теоретического обоснования способа подачи порошка в зону деформации газо-порошковой струей.
3. Разработка устройства для подачи порошка в вальки газо-порошковой струей, исследование ее параметров и создание установки для осуществления формирования порошкового покрытия на полосе путем их совместной прокатки с использованием воздушно-порошковой струи для подачи порошка в зону деформации между вальками.
4. Экспериментальное исследование влияния режимов подачи порошка в воздушной струе на процесс формирования покрытия прокатной.

5. Проведение экспериментального исследования способа активизации схватывания порошкового покрытия и полосы при формировании покрытия в зоне совместной деформации в вальках порошка и полосы.

6. Получение аналитических выражений для определения контактных напряжений в очаге совместной деформации порошка и полосы при прокатке.

7. Изучение механических и эксплуатационных свойств покрытий.

Второй раздел посвящен теоретическому обоснованию влияния сдвиговых деформаций на процесс схватывания порошкового покрытия с поверхностью компактной подложки, а также способам интенсификации схватывания путем проведения при совместной деформации порошка и подложки дополнительных сдвиговых деформаций. Теоретически обосновывается возможность подачи порошка в межвалковую зону газо-порошковой струей. Рассматриваются кинематические параметры зоны подачи порошка в газо-порошковой струе и его совместной с полосой деформации, а также определяются напряжения, действующие в зоне соединения.

Основным условием, обеспечивающим схватывание двух твердых тел, является их совместная пластическая деформация в зоне соединения. При этом механизм схватывания этих тел протекает не по сплошной поверхности контакта, а по отдельным участкам этой поверхности, в активных центрах. Количество таких активных центров непосредственно влияет на прочность сварного соединения в твердой фазе. Активными центрами являются участки контактных поверхностей с диаметром 3...5 мкм, центрами которых являются места выхода дефектов кристаллической решетки, а именно дислокаций. Энергия дислокаций распространяется на всю небольшую площадь этих активных центров и определяет энергию сварки твердых тел при отсутствии внешнего нагрева.

Таким образом, для того, чтобы повысить прочность сварного соединения необходимо максимально повысить число или плотность дислокаций на контактных сварных поверхностях. Плотность дислокаций находится в прямопропорциональной зависимости от степени деформации. Количественная зависимость между плотностью дислокаций и степенью деформации была получена Ван Буреном (Ван Бурен. Дефекты в кристаллах: Пер. с англ. - М.: Мир, 1962. - 584 с.), которая устанавливает прямопропорциональное отношение между плотностью дислокаций и пластической деформацией, вносимой каждой дислокационной петлей. Эта зависимость предполагает размножение дислокаций по схеме Ф. Франка и Б. Рида в зависимости от степени



пластической деформации, определяемой по доли пластической деформации, вносимой одной дислокационной петлей в общую величину пластической деформации металла. А пластическая деформация осуществляется главным образом за счет механизма скольжения или перемещения отдельных дислокаций. В то же время вклад каждой дислокации в общую деформацию есть расстояние, на которое произошло их перемещение, то есть средняя длина пробега дислокаций. Величина пробега дислокаций зависит от величины пластического сдвига и определяется по известной зависимости

$$\lambda = \frac{\gamma}{\chi \cdot b \cdot \rho_0} \quad (1)$$

где  $\lambda$  — средняя длина пробега дислокаций;  $\gamma$  — величина пластического сдвига;  $b$  — вектор Бюргерса;  $\chi$  — коэффициент формы петли;  $\rho_0$  — плотность дислокаций.

Анализ формулы (1) показывает на функциональную прямопропорциональную зависимость плотности дислокаций от величины пластического сдвига или сдвиговой деформации. Следовательно, увеличение сдвиговых деформаций в зоне соединения двух твердых тел будет давать прирост плотности дислокаций, что в свою очередь повысит качество активных центров схватывания и, следовательно, прочность схватывания двух соединяемых контактных поверхностей.

Таким образом, любое увеличение сдвига в зоне соединения двух тел, помимо той величины сдвига, которая всегда сопровождает пластическую деформацию, будет содействовать росту прочности соединения.

Для того, чтобы оценить величину сдвига в зоне соединения и определить способы его увеличения теоретически были получены выражения, количественно определяющие величину относительного сдвига на контактной поверхности в процессах осадки и прокатки. При этом делалось предположение, что между инструментом и компактной подложкой, осаживаемой или прокатываемой, условно отсутствует тонкий порошковый слой покрытия. Относительный сдвиг определяется из выражения

$$\gamma_{zx} = \frac{\partial U_x}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial x} \quad (2)$$

где  $\gamma_{zx}$  — величина сдвига на контактной поверхности в точке с координатами  $Z$  и  $X$ ;  $U_x$  и  $U_z$  — перемещение точек контактной поверхности в направлении осей  $Z$  и  $X$ .

Для процесса простой осадки решением выражения (3) получена зависимость

$$\gamma_{zx} = -\frac{1}{2} X \sqrt{\frac{h_0}{Z^3}} \quad (3)$$

где  $h_0$  - начальная высота цилиндрического образца или компактной подложки. При этом ось  $Z$  проходит через центр образца, а ось  $X$  вдоль основания образца. Из (3) видно, что в центре образца сдвиг равен 0, а максимальная его величина на краях контактной поверхности, где и будет максимальное схватывание поверхности образца с покрытием.

Из предположения, что осадка сопровождается боковым смещением образца на произвольную величину  $S'$ , тогда выражение (3) примет вид

$$\gamma_{zx} = -\frac{1}{2} X \sqrt{\frac{h_0}{Z^3}} - \frac{S'}{h_0 - h_k} \quad (4)$$

где  $h_k$  - конечная высота образца после осадки.

Анализ выражения (4) показывает, что боковое смещение образца дает увеличение сдвига на величину  $\frac{S'}{h_0 - h_k}$  на одном из краев образца, что и приводит к более лучшему схватыванию покрытия на этом участке по сравнению с простой осадкой.

Для процесса прокатки (рис. 1) решением (2) применительно к контактной зоне между валком и полосой, с предположением, что точки контактной поверхности перемещаются с ускорением от входа до выхода из валков получены зависимости:

для зоны отставания

$$\begin{aligned} \gamma_{zxот} = & (1 - S_H) \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{X^2}{R^2}}} \left[ \sin\left(\frac{L_2 + \arcsin \frac{X}{R}}{2}\right) - \right. & (5) \\ & \left. - \cos\left(\frac{L_2 + \arcsin \frac{X}{R}}{2}\right) \left(\frac{L_2 - \arcsin \frac{X}{R}}{2}\right) \right] + \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{X^2}{R^2}}} * \\ & * \frac{L_2 - \arcsin \frac{X}{R}}{L_2 - d_H} \left[ \sin\left(\frac{L_2 + \arcsin \frac{X}{R}}{2}\right) - \cos\left(\frac{L_2 + \arcsin \frac{X}{R}}{2}\right) \left(\frac{L_2 + \arcsin \frac{X}{R}}{4}\right) \right]; \end{aligned}$$

для зоны опережения

$$\begin{aligned} \gamma_{zxоп} = & \frac{S_H}{\sqrt{1 - \frac{X^2}{R^2}}} \left[ 1 - \frac{\arcsin \frac{X}{R}}{d_H} \right] + \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{X^2}{R^2}}} * & (6) \\ & * \left[ \sin\left(\frac{d_H + \arcsin \frac{X}{R}}{2}\right) - \cos\left(\frac{d_H + \arcsin \frac{X}{R}}{2}\right) \left(\frac{d_H - \arcsin \frac{X}{R}}{2}\right) \right]; \end{aligned}$$

Схема нанесения порошковых покрытий прокаткой

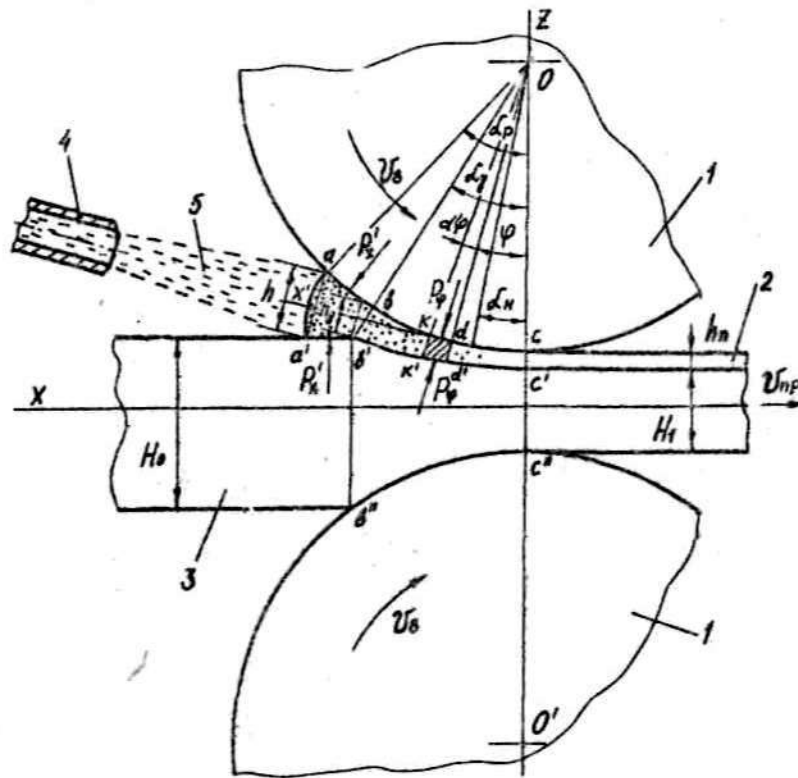


Рис. 1

1 - валки; 2 - покрытие; 3 - полоса; 4 - сопло;  
5 - газо-порошковая струя

где  $S_M$  - отставание;  $S_A$  - опережение;  $R$  - радиус валков;  $\alpha_n$  - нейтральный угол;  $\alpha_g$  - угол прокатки полосы.

Анализ выражений (5) и (6) показывает, что с уменьшением отставания и увеличением опережения величина сдвига точек на контактной поверхности полосы на выходе из валков увеличивается. Следовательно, для увеличения сдвига и повышения прочности сцепления покрытия с полосой необходимо осуществлять процесс прокатки так, чтобы величина зоны опережения была как можно больше. Этого можно достигнуть применяя переднее натяжение полосы или ведя прокатку с применением холостого валка со стороны наносимого покрытия, где в этом случае увеличивается зона опережения.

В качестве способа подачи порошка в зону деформации между валками в данной работе обосновывается и исследуется газо-порошковая струя, которая должна обеспечить высокую производительность процесса прокатки и равномерный качественный тонкий слой покрытия на полосе.

Газо-порошковая струя представляет собой смесь порошка материала покрытия и транспортирующего этот порошок газа, которая формируется в струю на выходе из сопла, направленную в межвалковую зону.

Транспортируемый газовой струей порошок попадая в клиновидную зону между валком и полосой под действием сил трения, возникающих как между отдельными частицами порошка, так и между порошком и поверхностями валка и полосы, набивается в этом пространстве. Наполнение порошком этого пространства происходит до тех пор, пока силы трения удерживают его от воздействия сил газовой струи, которая стремится "выдуть" порошок из этой зоны. Незаклинившийся порошок будет выноситься из зоны обработанной струей газа. Вынос незаклинившегося порошка может осуществляться в направлениях к торцам валков или сквозь зазор между валками, либо в других направлениях, исходя из формы бочки валков или по специальным отводящим каналам.

Величина уровня заполнения порошком зоны между валком и полосой будет зависеть от расхода и скорости движения порошка в струе. С ростом расхода порошка величина этого уровня будет расти, определяя толщину получаемого слоя покрытия после прокатки захваченного валками и полосой порошка. При этом угол захвата порошка будет определяться по зависимости, известной из прокатки порошков на подложке. Но так как углы захвата в данном случае большие, то в большинстве случаев весь порошок, заносимый струей, будет

захвачен валком и полосой.

Аэродинамический расчет показал, что кинетическая энергия струи не оказывает существенного уплотняющего действия на достаточно узкий уровень порошка на всем диапазоне скоростей свободных газовых дозвуковых струй. Таким образом порошок дополнительно не уплотняется в его зоне заклинивания.

Большие скоростные возможности свободных газовых струй позволяют вести устойчивую подачу порошка практически при любых промышленных скоростях прокатки.

Для получения качественного равнотолщинного слоя покрытия необходимо, чтобы подача порошка в свободной газовой струе обеспечивала бы равномерное по всей ширине полосы заполнение порошком зоны заполнения и захвата порошка между валком и полосой. Для этого была проанализирована структура сечений свободной газовой струи с целью выявления распределения скоростей и расходов порошка в газо-порошковой струе. Анализ структуры струи показал, что для круглых струй, формируемых круглыми соплами, распределение скоростей и расходов имеет концентрический вид распределения относительно оси сопла. При этом максимальные скорости и расходы порошка находятся на этой оси. Их значения падают по мере удаления от оси сопла и от его края или выхода. Таким образом круглые сопла не могут применяться для подачи в узкую целевидную зону между гладкими валками и полосой, а могут быть рекомендованы для накатки порошка на круглые профили, например, на прутки или проволоку. В этой связи применительно к прокатке полосы были изучены плоские свободные струи, формируемые щелевидными соплами. Их анализ показал, что на определенных удалениях от сопла они обеспечивают достаточно высокую равномерность скоростей и расхода порошка вдоль поперечного сечения струи. Это дает возможность их использования для подачи порошка в узкую зону между полосой и гладким валком, обеспечивая равномерность заполнения порошком этой зоны по всей ширине.

Для того, чтобы частицы порошка не осели вниз, не долетая до валков, необходимо, чтобы их скорость в струе была бы не меньше скорости витания, определяемой из закона аэродинамики.

В работе также рассматривается геометрия и кинематика очага совместной деформации порошка и полосы. Совместная прокатка порошка и полосы может сопровождаться пластическим течением полосы и без него. В последнем случае для получения соединения с покрытием необходимо наличие на поверхности полосы микронеровностей,

Угол совместной пластической деформации порошка и полосы теоретически можно определить так:

$$\alpha_g = \sqrt{\frac{\Delta H}{2(R+h_n)}} \quad (8)$$

В данной работе определялись и контактные напряжения, действующие в очаге деформации при совместной прокатке порошка и полосы.

Контактные нормальные напряжения на участке  $ab'a'b'$  (рис. 1) определяли по аналогии с определением напряжений при прокатке порошка и полосы без объемной деформации последней. Выражение для определения напряжений на этом участке имеет вид

$$P'_x = \beta \left( \frac{h_g \rho_g}{h} \right)^m \left[ \left( \sigma_s + \sigma_{тс} \frac{m-1}{\delta-m} \right) \left( \frac{h}{h_x} \right)^\delta - \sigma_{тс} \frac{m-1}{\delta-m} \left( \frac{h}{h_x} \right)^m \right], \quad (9)$$

где  $h_g$  и  $\rho_g$  - высота и плотность сечения порошка в момент начала пластической деформации подложки;  $m$  - показатель интенсивности уплотнения порошка;  $\sigma_s$  - предел текучести материала порошка;  $\sigma_{тс}$  - усредненное сопротивление деформации порошка;

$$\sigma_{тс} = \sigma_s + \frac{\rho_g a_n (h-h_g)^n}{h^n};$$

$$\delta = \frac{\mu + \mu_t}{2 \operatorname{tg} \left( \frac{\alpha_p - \alpha_g}{2} \right)},$$

где  $a_n, n$  - эмпирические коэффициенты для определения сопротивления деформации металла, упрочняемого в результате наклепа;  $\mu$  и  $\mu_t$  - коэффициенты внешнего трения порошка о поверхность валка и о поверхность подложки.

Контактные нормальные напряжения на участке  $bcb'c'$  определяли путем совместного решения условия равновесия элементарного объема порошкового слоя  $kadk'a'$  и условия пластичности прессуемого порошка. В результате получены уравнения:

$$\text{для зоны отставания} \\ P_{\text{от}} = \beta \sigma_{ск} \left( \frac{h_x}{h_g} \right)^\delta + \beta \sigma_{тс} \rho_n^m \frac{m}{m+\delta} \left[ \left( \frac{h_n}{h_x} \right)^m - \left( \frac{h_n}{h_g} \right)^m \left( \frac{h_x}{h_g} \right)^\delta \right]; \quad (10)$$

для зоны опережения

$$P_{v,m} = \beta \sigma_{tm} \rho_n \left[ \frac{m}{m-\delta} \left( \frac{h_n}{h_g} \right)^m - \frac{\delta}{m-\delta} \left( \frac{h_n}{h_g} \right)^{\delta} \right], \quad (II)$$

где  $\sigma_{sk}$  - предел текучести материала полосы;  $\rho_n$  - плотность покрытия;  $\sigma_{tn}$  - сопротивление деформации порошка;

$$\sigma_{tc} = \sigma_s + \frac{\rho_n a_n (h_g - h_n)^n}{2 h_g^n};$$

$$\sigma_{tn} = \sigma_s + \frac{\rho_n a_n (h_g - h_n)^n}{h_g^n};$$

$$\delta = R \delta_g \frac{\mu + \mu_c}{h_g - h_n}.$$

Третий раздел содержит описание экспериментальной установки, аппаратуры, материалов и методики исследований.

Исследования процесса формирования порошковых покрытий на полосе ее совместной прокаткой с металлическим порошком при его подаче в зону деформации между вальками воздушно-порошковой струей проводилось на прокатном дуо-стане с диаметром вальков 184 мм, на котором было смонтировано специальное устройство подачи порошка.

Устройство для подачи порошка в вальки состоит из газо-порошкового смесителя эжекторного типа, установленного перед входом в вальки так, что ось центричного сопла этого смесителя была направлена в зону деформации. На выходе из вальков, прилегая к ним, находился бункер, на дно которого засыпался применяемый порошок. Установка бункера на выходе из вальков обеспечивала улавливание порошка, который, засасываясь смесителем, в который подавался сжатый воздух по специальным каналам, поступал в этот смеситель, смешиваясь там с воздухом, и образованная таким образом воздушно-порошковая смесь в виде струи через сопло попадала в зону заклинивания порошка между полосой и вальком, а незаклинившийся порошок, проскакивая сквозь вальки по бокам полосы и улавливался бункером, установленным сзади вальков.

Таким образом, порции недействующего порошка опять возвращались, ссыпаясь на дно бункера, в рабочий цикл. Устройство также содержало и боковые каналы отвода порошка от торцов вала к бункеру. Боковые каналы обеспечивали задержку недействующего порошка в зоне заклинивания в случае узкой щели между валами.

Перед ведением процесса нанесения порошковых покрытий определялись режимы подачи порошка в воздушно-порошковой струе. Эжекторный смеситель тарировался по определенным значениям расхода и скорости порошка в струе, определяемым по специально разработанным методикам. Это давало возможность определить влияющие параметры струи на режимы прокатки и параметры покрытия.

Для измерения усилий прокатки при формировании покрытия на полосу использовали мессдозы сжатия с наклеенными датчиками с электросопротивлением 100 Ом и базой 10 мм. Упругий элемент мессдозы изготавливали из стали 60ХГСА с термообработкой. Измерения сопротивления датчиков под нагрузкой и разбаланс моста усиливали тензометрическим усилителем УТЧ-1 и записывали на ленте быстродействующего самопишущего прибора НЗ20-5М с последующей расшифровкой полученных данных.

Для исследования выбирались в качестве полосы такие материалы как сталь 08 кп, Ст 3 кп и медь М-4. В качестве материалов покрытия использовались порошки меди, олова, алюминия, высоколегированной стали ПХ30-2С, а также порошковая шихта антифрикционного состава, содержащая медь, графит, никель и железо.

Изучались свойства и параметры получаемых покрытий - толщина, прочность сцепления с полосой, микротвердость, плотность и износостойкость. Толщину покрытия определяли металлографическим методом с помощью металлографического микроскопа ММУ-3.

Прочность сцепления покрытия с полосой определяли по методике изгиба образца полосы с покрытием до появления первой трещины и отслоения покрытия. Микротвердость покрытий определяли на микротвердомере ПМТ-3. Плотность покрытия определяли расчетным методом, а также изучалась металлографическим методом на нетравленных шлифах.

Испытание на трение износостойкого покрытия проводили на машине трения М-22 П.

Поверхность полосы перед нанесением покрытия обрабатывалась до определенной шероховатости, величину которой определяли с помощью профилографа-профилометра модели 201.



В работе также описывается установка для термообработки полос с покрытием в вакууме. Регистрацию давления остаточных газов в этой установке осуществляли с помощью ионизационно-термопарного вакуумметра ВИТ-2 с использованием преобразователя низкого вакуума ПМТ-4 и высокого вакуума ПМТ-2. Температура термообработки устанавливалась и регистрировалась с помощью автоматического потенциометра КСПЗ УЗ и хромель-алюминиевой термопары.

Четвертый раздел содержит результаты экспериментальных исследований, проведенных с целью определения влияния факторов процесса совместной прокатки полосы и порошка при подаче последнего в зону деформации между валками воздушно-порошковой струей на параметры порошкового покрытия и условия прокатки, а также для проверки полученных теоретических зависимостей и для определения свойств получаемых покрытий.

Изучено влияние режимов подачи порошка в воздушно-порошковой струе на величину уровня угла заполнения порошком зоны между полосой и валком, которая определяет толщину получаемого покрытия. Установлено, что в диапазоне скоростей движения порошка до 40 м/с основным параметром воздушно-порошковой струи, влияющим на величину этого уровня, является расход порошка.

Установлено, что на величину уровня угла заполнения порошком зоны между валком и полосой влияет также радиус валков и ширина полосы. При этом величина фракции порошка в диапазоне 5...200 мкм не влияет на величину этого уровня.

Определен оптимальный зазор между полосой для заклинивания порошка в зазоре между полосой и валком в начальный момент прокатки, который обеспечивает непролет частиц порошка сквозь зону деформации. Это условие имеет вид:

$$h_3/d_2 \leq 4...5,$$

где  $h_3$  - зазор между полосой и валком;  $d_2$  - средний диаметр частиц порошка.

Изучена зависимость толщины получаемого покрытия от значения расхода порошка в струе и от скорости прокатки и степени деформации полосы. Установлено, что воздушно-порошковая струя обеспечивает получение равнотолщинных качественных тонких порошковых покрытий толщиной до 1 мм при скоростях прокатки от 0,06 до 0,47 м/с, при этом подача порошка обеспечивала необходимую толщину покрытия. При различных степенях деформации подложки определено давление прокатки. Расчетные зависимости (8-11) согласуются с экспериментальными данными.

БИБЛИОТЕКА  
Учреждения образования  
"Томский государственный университет"

Определена прочность сцепления покрытия с полосой в зависимости от величины шероховатости поверхности полосы. Получено оптимальное соотношение высоты выступов микронеровностей шероховатости и толщины покрытия. Установлено влияние на прочность сцепления покрытия величины толщины этого покрытия, дисперсности применяемого порошка, степени деформации полосы, величины зернистости структуры металла полосы и термообработки в вакууме.

Установлено, что при прокатке с одним холостым валком при расположении холостого вала со стороны порошкового слоя прочность сцепления покрытия повышается по сравнению с двухприводной схемой прокатки. Так как разница в этих случаях заключается в том, что при прокатке с одним холостым валком зона опережения со стороны холостого вала увеличивается, то это подтверждает теоретический анализ, предполагающий зависимость повышения прочности сцепления покрытия с полосой при увеличении зоны опережения.

Изучена микротвердость покрытий и их плотность. Определено, что относительная плотность покрытий составляет 0,93...0,96, то есть покрытия являются достаточно плотными. А предлагаемый способ нанесения покрытий может быть рекомендован для получения защитных медных, оловянных, алюминиевых покрытий. Были изучены также антифрикционные свойства полученных медно-графито-никель-железных покрытий. Полосы с таким покрытием могут использоваться для изготовления подшипников скольжения.

Исследование процесса получения порошковых покрытий на полосе совместной прокаткой порошка и полосы позволили получить практические рекомендации по применению способа для получения различных покрытий на полосовом прокате. Так, в данной работе предложена технология получения биметаллических втулок в качестве подшипников скольжения. Технология включает поверхностную подготовку поверхности, совместную прокатку полосы и порошка, термообработку полученных полос с покрытием, штамповку из них свертных втулок. Результаты исследований прошли опытно-промышленное испытание на Белорусском металлургическом заводе.

#### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Из анализа научных исследований найдена взаимосвязь сдвиговых деформаций на контактной поверхности двух твердых тел, совместно пластически деформируемых, с плотностью дислокаций, которая, в свою очередь, определяет прочность соединения поверхностей; получена зависимость для определения сдвиговой деформации на

контактных поверхностях в процессах осадки и прокатки. Определены факторы, влияющие на сдвиговые деформации при нанесении тонких покрытий из порошка на полосу при совместной прокатке порошка и полосы.

2. Теоретически обоснована возможность подачи металлического порошка в зону деформации между валками газо-порошковой струей.

3. Получены и экспериментально проверены аналитические выражения для определения нормальных контактных напряжений при совместной прокатке порошка и полосы.

4. Разработано и создано устройство для формирования тонкого покрытия из порошка на металлической полосе совместной прокаткой порошка материала покрытия при подаче в валки последнего воздушно-порошковой струей.

5. Экспериментально изучена величина уровня заполнения порошковой зоны между полосой и валком в зависимости от скорости и расхода порошка при его подаче в воздушно-порошковой струе, от радиуса валков, ширины полосы и фракции порошка. Определен оптимальный зазор между валком и полосой, обеспечивающий заклинивание порошка при его захвате.

6. Исследована зависимость толщины наносимого покрытия от режимов подачи порошка в воздушно-порошковой струе, а также от степени деформации полосы и скорости прокатки.

7. Проведено экспериментальное исследование прочности соединения покрытия и полосы в зависимости от шероховатости поверхности полосы, толщины покрытия, фракции порошка, степени деформации полосы, схемы привода валков и зернистости структуры металла полосы.

8. Проведено экспериментальное исследование микротвердости и антифрикционных свойств полученных покрытий.

9. Разработан технологический процесс получения подшипников скольжения в виде биметаллических втулок, штампуемых из полос с нанесенным прокаткой антифрикционным покрытием. Биметаллические втулки, полученные по предложенному технологическому процессу, прошли производственные испытания на Белорусском металлургическом заводе и показали превышение срока службы над базовым вариантом в 3...4 раза с ожидаемым экономическим эффектом 15 000 рублей в год ( по ценам 1990 года).

Основные положения диссертации изложены в работах:

1. Сычев Е.Г., Бобарикин Ю.Л. Исследование процесса накатки металлического порошка на ленту // Научно-техническая конференция "Прогрессивные процессы обработки металлов давлением": Тез. докл. - Гомель, 1989. - С.68-69.
2. Сычев Е.Г., Бобарикин Ю.Л. Нанесение покрытий при прокатке// Научно-техническая конференция "Актуальные проблемы пластической обработки металлов": Тез. докл.- Варна, 1990.- С.54.
3. Сычев Е.Г., Бобарикин Ю.Л. Нанесение порошковых покрытий прокаткой // Материалы семинара "Порошковая металлургия и композиционные материалы": Тез. докл.- Ленинград, 1990.
4. Сычев Е.Г., Бобарикин Ю.Л. Накатка антифрикционного покрытия из металлических порошков на стальную ленту // XVII Всесоюзная конференция по порошковой металлургии: Тез. докл.- Киев, 1991.
5. Сычев Е.Г., Бобарикин Ю.Л. Устройство для получения прокаткой биметаллической ленты с напрессованным порошковым слоем // Всесоюзная научно-техническая конференция "Новые технологические процессы и оборудование для получения моно- и многослойных профилей и лент из порошковых, литых и пластически деформированных материалов: Тез. докл.- Сочи, 1991.- С.30-32.
6. Заявка 4939948 с положительным решением от 3.01.92, МКИ В22 3/18. Способ нанесения покрытий на ленту / Е.Г.Сычев, Ю.Л.Бобарикин и Л.П.Третьяк (СССР).
7. Заявка 4877312 с положительным решением от 4.01.92, МКИ В22 3/18. Устройство для получения многослойного проката/ Е.Г.Сычев и Ю.Л.Бобарикин (СССР).
8. А.с. 1616786, МКИ В22 3/18. Способ прокатки тонкой металлической ленты / Е.Г.Сычев и Ю.Л.Бобарикин (СССР) - 3 с.ил.
9. А.с.1650360, МКИ В22 3/18. Устройство для получения многослойного проката / Е.Г.Сычев и Ю.Л.Бобарикин (СССР) - 4 с.ил.
10. Сычев Е.Г., Бобарикин Ю.Л. Механические свойства покрытий, полученных прокаткой из металлических порошков // VI Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава ПНИ: Тез. докл.- Гомель, 1992.- С.30.

ЕОВАРИЧКИН Юрий Леонидович

РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ТОНКИХ  
ПОРШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ ПРОКАТКОЙ

05.16.05 - Обработка металлов давлением

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Корректор Т.И. Павлович

Подписано в печать 14.12.92.

Формат 60x84<sup>1</sup>/16. Бумага тип. № 2. Сфсет, печать.

Усл.печ.л. 1,2. Уч.-изд.л. 1,0. Тир. 100. Зак. 1169. Бесплатно.

Белорусская государственная политехническая академия.

Отпечатано на ротационной БГА, 220027, Минск, пр.Ф.Скорины, 65.