

активации реализуется путем подогрева основы. Экспериментально было установлено, что для всех сочетаний веществ и материалов существует температура подогрева основы, обеспечивающая резкое повышение прочности сцепления. Согласно данным работы [3], контактная температура, обеспечивающая надежные континуальные связи самофлюсующихся сплавов со стальной основой, рассчитанная с использованием формул Н.Н. Рыкалина и В.В. Кудинова, составляет 1223 К. Определяющую роль в формировании соединения исследуемых покрытий с основой играют процессы образования твердых растворов и взаимной диффузии никеля и железа. Процессы электронного взаимодействия сводятся к коллективизации (обобщению) валентных электронов положительными ионами, образованию "металлической" связи, особенностью которой является отсутствие предела насыщения. В работе [3] установлено, что металл основы – железо начинает активно растворяться в жидких самофлюсующихся сплавах при температуре выше 1373 К.

В реальных условиях, как показали исследования многих авторов, при взаимодействии твердой и жидкой металлических фаз первые стадии процесса и следующая за ними диффузия протекают, как правило, настолько быстро, что разделить их практически невозможно. Составы фаз, находящихся в контакте, устанавливаются в соответствии с требованиями равенства их химических потенциалов, и даже незначительное время их существования будет способствовать протеканию диффузии в направлении установления фазового равновесия. Процесс оплавления неизбежно будет сопровождаться той или иной степенью развития процессов массопереноса. Интенсивность их протекания определяется температурой, длительностью контактирования, градиентом концентраций и другими факторами.

Исследования процессов оплавления самофлюсующихся сплавов традиционными методами показали, что происходит диффузионное перемещение железа из основного металла в покрытие и углерода из покрытия в основной металл. Ширина диффузионной зоны растет с увеличением времени выдержки при температуре термической обработки по параболическому закону, при этом граница снижения твердости смещается к поверхности покрытия. При перегреве расплава покрытия выше температуры плавления основы растворение стали определяется не атомным механизмом диффузии, а динамикой конвективных потоков жидкости, температурой перегрева и временем контактирования фаз. При оплавлении желательнее не перегревать расплав и сокращать время контактирования твердой и жидкой фаз путем уменьшения температуры нагрева поверхности основного металла и увеличения скорости охлаждения. Для получения соединения самофлюсующихся сплавов с основой, обеспечивающей высокую прочность сцепления и качество покрытий, время контакта фаз на основе теоретических расчетов должно составлять 0,6...0,8 с. Увеличение времени контакта свыше 0,8...1,2 с не приводит к росту прочности сцепления.

Таким образом, для получения упрочняющих слоев высокого качества, обладающих прочной связью с основой, процесс лазерной обработки напыленных никельхромборкремниевых покрытий необходимо вести на режимах, обеспечивающих время контактирования расплава с основой 0,6...0,8.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.М.Лахтин, В.П.Леонтьева. Материаловедение. М. – Изд-во «Машиностроение», 1990 – С.527.
2. В.А.Витязь и др. Теория и практика нанесения защитных покрытий. – Мн., «Беларуская навука», 1998. – С.582.
3. Спиридонов Н.В. Формирование износостойких поверхностных слоев концентрированными потоками энергии /Н.В.Спиридонов. – Минск: БНТУ, 2012. – 183 с. – Монография.

УДК 621.914+621.787

Турейко Д.Н., Баршай И.Л.

УПРОЧНЕНИЕ СТАЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК ИГЛОФРЕЗЕРОВАНИЕМ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

В статье изложены результаты изучения влияния иглофрезерования на упрочнение стальных заготовок, в частности, на поверхностное пластическое деформирование. Использование

полученных данных позволит оптимизировать условия для формирования упрочнения стальных заготовок в зависимости от условия эксплуатации.

В настоящее время разрабатываются новые технологии обработки проволочным инструментом (иглофрезами), что приведет к расширению классификации как в направлении развития новых физических процессов, протекающих в зоне контакта инструмент-заготовка, так и в направлении увеличения видов обработки.

Методы обработки проволочным инструментом можно различить по следующим признакам:

- по характеру физических процессов, протекающих в зоне контакта «инструмент-заготовка»: без удаления стружки — поверхностная иглодеформирующая обработка, с удалением стружки — иглолезвийная обработка (кращевание, обработка режущими щетками, иглофрезерование);
- по виду обработки: упрочняющая, отделочно-упрочняющая, упрочняюще-зачистная, отделочно-зачистная, зачистная.

Характер протекающих процессов в зоне «инструмент – заготовка» зависит от угла отжатия проволочных элементов, который определяется жесткостью ворса и параметрами режима обработки (в первую очередь усилием прижатия инструмента к обрабатываемой поверхности и скоростью вращения). При углах отжатия приблизительно до 20° протекают процессы микрорезания, дальнейшее увеличение указанного угла приводит к субмикрорезанию, а затем и поверхностному пластическому деформированию. Процессы микрорезания и субмикрорезания также в различной степени сопровождаются пластическим деформированием объемов металла, прилегающих к следам проволочек на обрабатываемой поверхности. Микрорезание осуществляется криволинейными (полукруглыми) гранями торцов проволочек, а субмикрорезание — микрорельефом этих граней.

Иглофрезерование — процесс, характеризуемый микрорезанием в зоне контакта ворса с заготовкой. В зависимости от получаемой шероховатости поверхности это может быть отделочно-зачистная и зачистная обработка. Шероховатость поверхности лежит в пределах $Ra = 100-0,32$ мкм, зависит в основном от диаметра игл ($\varnothing 0,2-1,0$ мм) и в меньшей степени от параметров режима обработки. Величина удаляемого за один проход припуска при зачистной обработке может достигать 3–5 мм, при отделочно-зачистной — составлять 0,02–0,04 мм. Иглофрезы изготавливают с длиной ворса, равной 12–22 мм, плотность набивки ворса на режущей поверхности инструмента составляет 75 – 85%.

Все иглофрезы подразделяются на следующие типы:

- по виду соединения игл: сварные, сборные, сборно-сварные;
- по конструкции: бескорпусные и корпусные;
- по форме боковых поверхностей, образованных иглами: с коническими и цилиндрическими боковыми поверхностями;
- по форме режущей поверхности: цилиндрические, ступенчатые, торцовые, гиперболические.

В зависимости от вида обрабатываемой поверхности различаются круглое и плоское иглофрезерование, а также иглофрезерование отдельных участков детали. При круглом иглофрезеровании осуществляется выполнение четырех движений формообразования: главного движения резания иглофрезы; движения круговой подачи детали (иглофрезы); движения продольной подачи детали (иглофрезы); движения поперечной подачи иглофрезы (детали), которые определяются соответственно величинами скорости резания, продольной и круговой подач, натягом (при использовании упругой установки иглофрезы натяг характеризуется усилием прижатия иглофрезы к обрабатываемой поверхности).

Плоское иглофрезерование осуществляется при выполнении трех движений: главного движения резания иглофрезы, движений продольной и поперечной подач.

В настоящее время разрабатываются новые технологии обработки проволочным инструментом, что приведет к расширению классификации как в направлении развития новых физических процессов, протекающих в зоне контакта инструмент - заготовка, так и в направлении увеличения видов обработки.

Поверхностная иглодеформирующая обработка характеризуется ударно-выглаживающим воздействием на обрабатываемую поверхность.

При преобладании выглаживающей составляющей воздействия (отделочно-упрочняющая обработка) наблюдается уменьшение шероховатости поверхности. Отмечено увеличение радиуса скругления вершин микропрофиля и повышение его относительно опорной кривой в 2 и более раз.

Параметры опорных кривых равны подобным параметрам приработанных поверхностей, т.е. поверхностная иглодеформирующая обработка создает рельеф, близкий к эксплуатационному.

На изменение параметров качества оказывает влияние технологическая наследственность. Оптимальными параметрами режима обработки, обеспечивающими минимальную шероховатость, являются скорость вращения иглофрезы 25–38 м/с, натяг 3–4 мм, время обработки 20 сек., диаметр ворса 0,4 мм.

Для повышения энергии удара проволочных элементов с упрочняемой поверхностью предложены иглофрезы с отражателем. Отражатель позволяет при подходе к обрабатываемой поверхности принудительно отклонять их концы в сторону, противоположную направлению вращения. Упругодеформированные проволочки, скользя по поверхности отражателя, на выходе из него резко разгибаются и производят удар с повышенной скоростью. За счет дополнительной кинетической энергии удара, создаваемой отражателем, глубина упрочненного слоя возрастает в 1,4 раза.

Для увеличения степени упрочнения, а также для выполнения упрочняюще-зачистной обработки применяются вращающиеся механические иглофрезы с ударными элементами [1]. Последние имеют различную форму и могут быть различно установлены относительно проволочных ворсовых элементов. Ударные элементы в виде проволочек, прядей троса и пластинчатые могут быть расположены непосредственно в ворсе, а также установлены секционно по периметру иглофрезы; элементы в виде шайб, дисков, секторов и т.п. устанавливаются секционно с отделением их от проволочного ворса с помощью пальцев.

При обработке поверхностей с окалиной, ржавчиной помимо упрочнения в процессе контактирования ударных элементов с обрабатываемой поверхностью происходит разрушение дефектного слоя с последующим удалением разрыхленных загрязнений проволочным ворсом. Глубина упрочненного слоя зависит от типа ударного элемента. При использовании ударных элементов в виде шайб массой 50 г глубина упрочненного слоя достигает 1,0–1,2 мм, а при массе шайб 20 г глубина упрочненного слоя достигает 0,5–0,6 мм. При обработке иглофрезами с ударными элементами в виде проволочных элементов, свободно установленных на пальцах, глубина упрочненного слоя составляет 0,15–0,2 мм, а при использовании ударных элементов в виде толстой проволоки, жестко закрепленной в корпусе порядка 0,1–0,15 мм.

При определенных режимах процесса иглофрезерования происходит не срезание микро- и макронеровностей на обрабатываемой детали, а их смятие, выглаживание, иными словами — холодная пластическая деформация, что в свою очередь приводит к упрочнению поверхности, или наклёпу.

Различают внутрикristаллитную и междикristаллитную деформации поликristалла. Деформация отдельных зерен поликristалла осуществляется скольжением или двойникованием, как и для монокristалла. Однако наличие значительного количества зерен в поликristалле приводит к некоторым особенностям процесса его пластической деформации.

Плоскости скольжения в отдельных зернах поликristалла произвольно ориентированы в пространстве. Разная их ориентировка приводит к тому, что при нагружении поликristаллического тела внешними силами пластическая деформация начинается не одновременно во всех зернах. В первую очередь пластическая деформация возникает в зернах с наиболее благоприятной ориентировкой плоскостей скольжения, т.е. такой, при которой последние совпадают с площадками действия наибольших по величине касательных напряжений, вызываемых данной системой сил. Остальные зерна деформируются упруго и могут получать лишь относительное смещение.

Увеличение деформации сверх значения, соответствующего пределу текучести, приводит в поликristалле к тому, что зерна получают вытянутую форму в направлении наиболее интенсивного течения металла. Определенная ориентировка вытянутых в результате пластической деформации зерен называется полосчатостью микроструктуры.

Соотношение между средними величинами наибольших и наименьших размеров зерен указывает на величину деформации зерен.

Одновременно с изменением формы зерен в процессе деформации происходит поворот кристаллографических осей отдельных зерен в пространстве. По мере протекания пластической деформации разница в направлениях кристаллографических осей отдельных зерен уменьшается, а плоскости скольжения стремятся совместиться с направлением наиболее интенсивного течения металла. Это приводит к тому, что при значительной деформации возникает преимущественная ориентировка кристаллографических осей зерен поликristалла, называемая текстурой деформации. Возникновение текстуры приводит к анизотропии свойств поликristалла.

Явление диффузионной пластичности, так же как и скольжение, может приводить к остаточным изменениям размеров и формы зерен, которые возникают в результате смещения дислокации.

Механизм диффузионной пластичности наиболее сильно проявляется в периферийных слоях зерен и по границам блоков мозаики. Этот механизм сопутствует скольжению. Его роль увеличивается при деформации с нагревом.

Разная ориентировка плоскостей скольжения в зернах поликристалла, а следовательно, и разная величина упругой деформации, соответствующей началу пластической деформации отдельных зерен, приводят при разгрузке к возникновению остаточных напряжений второго рода.

При разгрузке поликристаллического тела часть зерен сохранит некоторую долю напряжений, возникших в них при нагружении, а другая часть зерен получит напряжения обратного знака по сравнению с напряжениями, существующими при нагружении. Неодновременное включение зерен поликристалла в пластическую деформацию и возникновение при разгрузке остаточных напряжений второго рода приводят к некоторым особенностям деформирования.

1. Нарушение линейной зависимости деформаций от напряжений при нагружении выше предела пропорциональности.

2. Упругое последствие, которое состоит в том, что образец под постоянной нагрузкой, не превышающей предел текучести, с течением времени получает дополнительную деформацию, а после снятия внешних сил имеет некоторую остаточную деформацию, со временем уменьшающуюся или исчезающую.

3. Релаксация напряжений, заключающаяся в том, что с течением времени убывает усилие (напряжение), необходимое для поддержания постоянной деформации образца.

4. Упругий гистерезис – явление, характеризующееся тем, что линия нагружения на графике изменения усилия в зависимости от деформации не совпадает с линией разгрузки, образуя петлю гистерезиса, характеризующую работу, выделившуюся в процессе деформации в виде теплоты.

5. Эффект Баушингера, характеризующийся тем, что образец, предварительно деформированный за предел текучести, уменьшает сопротивление деформированию (т. е. пределы пропорциональности, упругости, текучести) при последующей деформации обратного знака.

6. Наличие площадки текучести.

Пластическая деформация приводит к значительному изменению механических, физических и химических свойств металла. В деформируемом металле с увеличением степени деформации увеличиваются все показатели сопротивления деформированию: пределы упругости, пропорциональности, текучести и прочности. Увеличивается также твердость металла. Одновременно с этим наблюдается уменьшение показателей пластичности (относительное удлинение, относительное сужение, ударная вязкость); увеличивается электрическое сопротивление, уменьшаются сопротивление коррозии, теплопроводность, изменяются магнитные свойства ферромагнитных металлов и т. п. Совокупность явлений, связанных с изменением механических и физико-химических свойств металлов в процессе пластической деформации, называется упрочнением (наклепом).

Одними из основных участков повышенного сопротивления смещению дислокации являются участки пересечения плоскостей скольжения, на которых взаимодействие силовых полей дислокации, перемещающихся по пересекающимся плоскостям, приводит к их «застреванию» и к последующему скоплению около них дислокации одинакового знака.

Однако можно полагать, что упрочнение является следствием не только увеличения сопротивления смещению дислокации по мере деформирования. Влияют на изменение механических свойств при упрочнении и блокообразование, и искривление плоскостей скольжения, и появление «обломков» кристаллов в пачках скольжения (резкий поворот отдельных ячеек блоков мозаики).

Кроме того, рядом исследований показано, что на изменение прочностных свойств в процессе деформирования сплавов, имеющих метастабильные структуры некоторых составляющих, оказывает влияние изменение структурного состояния этих фаз.

По представлениям С. Т. Кишкина [2], в процессе пластической деформации стали по плоскостям скольжения выделяются субмикроскопические частицы (карбиды), блокирующие сдвиги и способствующие упрочнению металла.

Для определения влияния режимов иглофрезерования на формирование наклепа в поверхностном слое заготовок была разработана методика эксперимента и проведена обработка

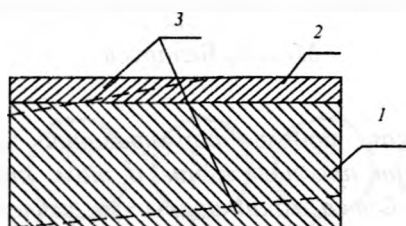
заготовок из сталей марок 20ХН3А, 25ХГМ, 20ХНР и 25ХГТ. Обработка проводилась на семи режимах для каждой марки стали, параметры режимов приведены в таблице 1.

Таблица 1 — Режимы обработки сталей иглофрезерованием

Режимы	№ п/п						
	1	2	3	4	5	6	7
Скорость резания V , м/мин	0,5	0,25	0,750	0,875	0,375	0,625	0,125
Подача S , мм/об	0,5	0,750	0,25	0,625	0,125	0,375	0,875
Патяг i , мм	0,5	0,25	0,75	0,125	0,625	0,375	0,875

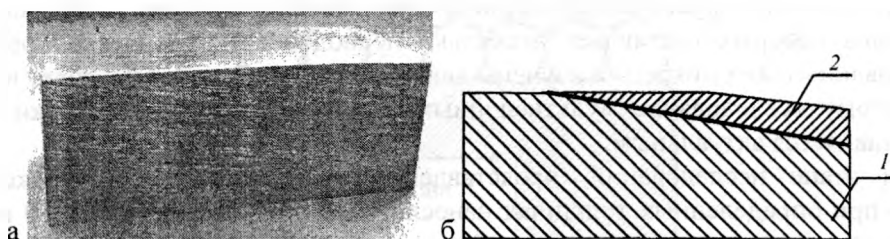
Диаметр фрезы 150 мм

Из обработанных заготовок были вырезаны прямоугольные образцы размером 47,6x23x19,7 мм (рис. 1.).



1 — основной металл, 2 — упрочненный поверхностный слой (наклеп), 3 — места съема металла
Рис. 1. — Исходный образец

Затем была проведена механическая обработка шлифованием каждого образца для получения косо́го шлифа. Причем шлифовка проводилась не только на поверхности с упрочненным слоем, но и на обратной поверхности образца с одной установки. В зонах 3 был произведен сьем металла. В результате шлифовки были получены косо́е шлифы, внешний вид (а) и эскиз (б) подготовленного к исследованию образца представлены на рис. 2.



1 — основной металл, 2 — косо́й шлиф поверхностного упрочненного слоя (наклеп) до основного металла
Рис. 2. — Образец после шлифовки

Затем была осуществлена доводка шлифов и проведены измерения микротвердости поверхности и приповерхностных слоев на разной глубине их залегания.

После обработки результатов измерений микротвердости поверхностного слоя, полученного при обработке иглофрезерованием, были построены графики зависимости твердости поверхностного слоя от расстояния от поверхности, что показывает распределение твердости в поверхностном слое.

Полученные результаты показывают, что если необходимо обрабатывать стальную заготовку иглофрезерованием, и наклеп не желателен, то обработку следует проводить в режиме 2 для всех рассмотренных сталей. Если необходимо получить наибольшее упрочнение поверхности при обработке иглофрезерованием, то для заготовок из стали 20ХН3А и 25ХГМ обработку нужно проводить в режиме 1 или 5, из стали 20ХНР в режиме 5, а из стали 25ХГТ в режимах 3 или 7. В

частности для заготовок из стали 20ХНЗА толщина упрочненного слоя более 20 мкм, из стали 25ХГМ — около 40 мкм, из стали 20ХНР — до 60 мкм, из стали 25ХГТ — до 40 мкм. Микротвердость поверхности повышается до 2,2-2,9 раза по сравнению с микротвердостью самого материала в зависимости от марки стали и режимов иглофрезерования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е.В. Перепичка «Очистно-упрочняющая обработка изделий иглофрезами» – М: Машиностроение, 1989.–136с. 2. С.Т. Кишкин Изв. АН СССР ОНТ №1 – 1948.—87-96с.

УДК 621.793

Фролов И.С., Иващенко С.А., Гречихин Л.И., Фролов Ю.И.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ МУЛЬТИСЛОЙНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Разработана теплофизическая модель формирования мультислойных ионно-плазменных покрытий. В основе модели лежит предположение о том, что определяющим фактором, от которого зависят структура и свойства таких покрытий, является температура слоя покрытия. Установлено, что оптимальный комплекс свойств мультислойного покрытия обеспечивается при температуре в слое покрытия от 0,1 до 0,8 температуры плавления материала покрытия.

В настоящее время одним из интенсивно развивающихся методов нанесения покрытий является ионно-плазменный с генерацией материала покрытия вакуумной дугой (вакуумный электродуговой или метод КИБ). Разработаны и широко используются на практике технологические процессы нанесения данным методом покрытий из нитридов и карбидов различных металлов. Покрытия такого типа используются в качестве защитно-декоративных и износостойких [1,2]. Одним из перспективных направлений развития данного метода является получение композиционных конденсатов путем создания мультислойных систем-покрытий, состоящих из большого количества нанослоев, толщина которых составляет несколько периодов кристаллической решетки. Однако вопросы формирования таких покрытий изучены явно недостаточно, что затрудняет их практическое применение. Поэтому исследование мультислойных покрытий с целью отработки технологии их получения представляется актуальным.

На первом этапе исследований, представленном в работе [3] было экспериментально установлено, что при определенных толщинах нанослоев нитрида титана (менее 50 нм) в покрытии формируется ультрадисперсная (квазиаморфная) структура, характеризующаяся высоким уровнем физико-механических и технологических свойств. Отмечено, что формирование таких нанослоев конденсата из-за их быстрого нагрева и охлаждения происходит в сильно неравновесных условиях, что приводит к образованию нанокристаллической структуры с большим количеством внутренних дефектов и искажений. При большей толщине нанослоев формируется характерная для ионно-плазменных конденсатов столбчатая структура покрытия. Была выдвинута гипотеза, что среди множества факторов, влияющих на появление аморфной фазы, определяющим, по-видимому, является толщина слоя покрытия. Так, в работе [4] образование аморфных фаз в пленках δ -NbN установлено при толщинах менее 25 нм, что согласуется с результатами, полученными выше. При толщине фазовых слоев около 30 нм обнаруживались лишь следы аморфной фазы.

Однако никаких теоретических основ этого явления в работах исследователей представлено не было, что не позволяло разрабатывать технологию формирования таких покрытий и обеспечить четкое прогнозирование их характеристик.

Поэтому на втором этапе исследований была разработана теплофизическая модель формирования мультислойных ионно-плазменных покрытий (рис. 1). В основе модели лежит предположение о том, что определяющим фактором, от которого зависят структура и свойства таких