

ТВЕРДОСТЬ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ПОКРЫТИЯ, НАНОСИМОГО МЕТОДОМ ФИНИШНОГО ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ

ТОПОЛЯНСКИЙ П.А., ЕРМАКОВ С.А., СОСНИН Н.А.

Санкт-Петербургский государственный политехнический
университет, Санкт-Петербург, Россия

При финишном плазменном упрочнении (ФПУ) обеспечивается нанесение при атмосферном давлении с помощью плазмохимического генератора тонкопленочного износостойкого покрытия на последней стадии обработки детали или инструмента.

Целью данной работы являлось исследование влияния различных факторов на твердость поверхности с покрытием после ФПУ.

Характер и интенсивность износа трущихся поверхностей определяются условиями, в которых работает изделие, и такими характеристиками его рабочей поверхности, как шероховатость, твердость, наличие защитного покрытия и др. В зоне контакта трущейся пары наблюдается множество явлений механического и физико-химического взаимодействия материалов, определяющих характер износа их поверхностей [1]. Это – процессы упрочнения и разупрочнения контактирующих участков поверхности за счет их многократного деформирования, выделение теплоты, изменение структуры, окисление, схватывание за счет микросваривания неровностей с последующей эрозией и другие. Среди различных теорий трения выделяется молекулярно-механическая (или адгезионно-деформационная) теория, наиболее полно учитывающая процессы, протекающие при трении.

Деформационное взаимодействие проявляется в участках касания шероховатых поверхностей и вызывает многократное деформирование поверхностного слоя неровностями. Механическое воздействие может иметь характер упругого или пластического взаимодействия, а также – микрорезания.

Адгезионное взаимодействие возникает при образовании в зоне контакта мостиков микросварки.

Снижению интенсивности и даже подавлению износа согласно молекулярно-механической теории способствует:

- предотвращение образования прочных адгезионных связей в парах трения;
- увеличение твердости трущейся поверхности.

Нанесение прочного тонкопленочного покрытия на трущуюся поверхность способно, с одной стороны, образовать пленочный барьер, предотвращающий схватывание сопрягаемых поверхностей, а с другой – увеличить твердость поверхности.

Наносимое при ФПУ конденсацией из дуговой или высокочастотной плазмы кремнийсодержащее покрытие (Рис. 1) базового состава SiC - SiO₂, являясь диэлектриком, образует пленочный барьер, препятствующий схватыванию контактируемых поверхностей. Кроме того, это покрытие обладает определенной коррозионной стойкостью и жаростойкостью, что подтверждается испытаниями образцов на воздушную коррозию при температурах до 800-1000 °С. На фотографиях поперечных шлифов (Рис. 1), полученных с помощью электронного микроскопа, выявляется слоистая структура пленочного покрытия, что может быть связано с цикличностью его нанесения. При этом в покрытии при увеличении $\times 10000$ (и более) не обнаруживаются несплошности, поры и другие дефекты.

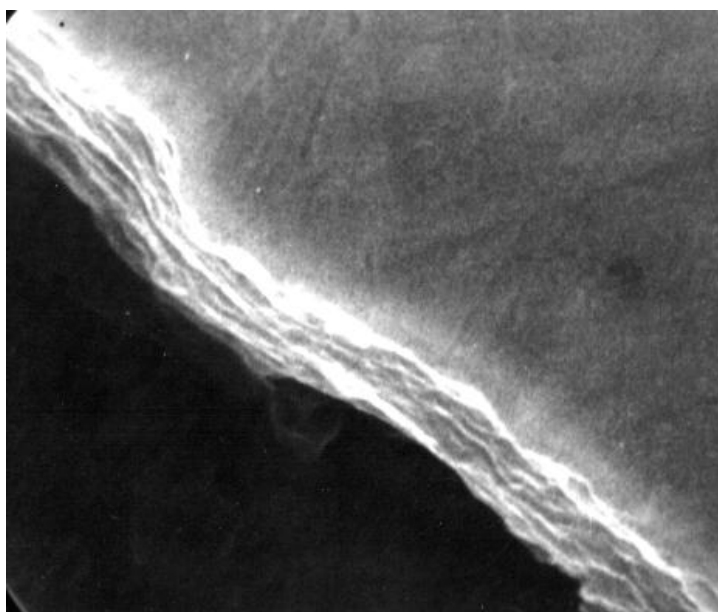


Рис. 1. Поперечный шлиф образца с плазменным упрочняющим пленочным покрытием, полученным при атмосферном давлении ($\times 5000$)

При формировании упрочняющего пленочного покрытия оно практически повторяет профиль подложки (Рис. 1). Так, значения параметра шероховатости R_a партии образцов после окончательной полировки, замеренные на профилометре модели 170621 завода «Калибр» на длине трассы 3 мм, соответствовали 0,011-0,013 мкм. После ФПУ параметр шероховатости R_a для всех образцов соответствовал значению 0,013-0,016 мкм. Таким образом, шероховатость поверхности практически не изменилась, и находится в диапазоне одного класса.

Повышение твердости поверхности с покрытием, затрудняя пластическую деформацию и исключая микрорезание, способствует упругому взаимодействию трущихся поверхностей, наиболее

благоприятному для повышения износостойкости. Отсюда следует правомерность оценки работоспособности поверхности с упрочняющим тонкопленочным покрытием по ее твердости (микротвердости).

Сложность измерения твердости тонких покрытий заключается в том, что даже при оценке микротвердости, например, с помощью прибора ПМТ-3 (по ГОСТ 9450-80) происходит прокалывание покрытия, и фактически измерение в этом случае дает значение микротвердости композиции покрытие-подложка. Очевидно, что с уменьшением нагрузки на индентор глубина отпечатка уменьшается; при этом доля участия покрытия в поверхностной микротвердости возрастает, и результат измерения будет больше соответствовать реальной микротвердости покрытия.

Для оценки твердости самого пленочного упрочняющего кремнийсодержащего покрытия, была использована мягкая подложка – образец из меди с нанесенным покрытием. Полученная зависимость микротвердости от нагрузки на индентор (Рис. 2) имеет три характерных участка.

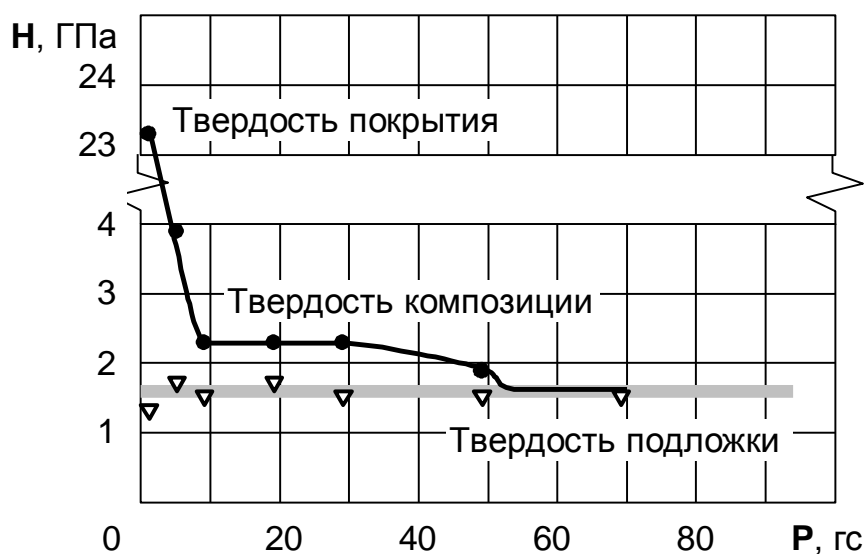


Рис. 2. Зависимость микротвердости композиции покрытие-подложка от нагрузки на индентор (основа – медь)

На первом участке при больших нагрузках на индентор вклад покрытия в микротвердость не проявляется, т.к. на мягкой подложке покрытие полностью разрушается. На втором участке кривой (при нагрузках 10, 20 и 30 гс) покрытие, хотя и прокалывается индентором, но полного его разрушения в зоне отпечатка не происходит. Некоторое увеличение микротвердости композиции покрытие-подложка отражает реакцию прокалываемого покрытия. На третьем участке при нагрузках 5 и 2 гс наблюдается резкое

повышение измеряемой микротвердости, свидетельствующее о том, что при малой глубине отпечатка данные измерения приближаются к реальной твердости самого покрытия. Аналогичные результаты были получены и в других экспериментах при измерении микротвердости с использованием индентора Кнупа: микротвердость поверхности с пленочным кремнийсодержащим покрытием на подложке ВК-17 достигала 22...24 ГПа.

Проведенные совместно с Институтом Макса Планка в Германии исследования показали, что при нагрузке 0,5 гс и менее максимальная твердость покрытия достигает величины порядка 52 ГПа при модуле упругости покрытия E порядка 160 ГПа. Глубина отпечатка при этом составляла доли микрометра.

В процессе измерений микротвердости поверхности различных образцов с пленочным покрытием было установлено, что в месте укола алмазного индентора на покрытии, полученном при помощи высокочастотного плазмотрона, наблюдаются сколы и отслоения, что свидетельствует о низкой адгезии такого покрытия к подложке и повышенной хрупкости самого осажденного слоя. На покрытиях, нанесенных с использованием разработанного дугового плазмотрона с плазмохимическим генератором, такой картины не наблюдается – сколы или трещины в месте укола индентора отсутствуют (Рис. 3 – получен совместно с А.Л.Голозубовым).

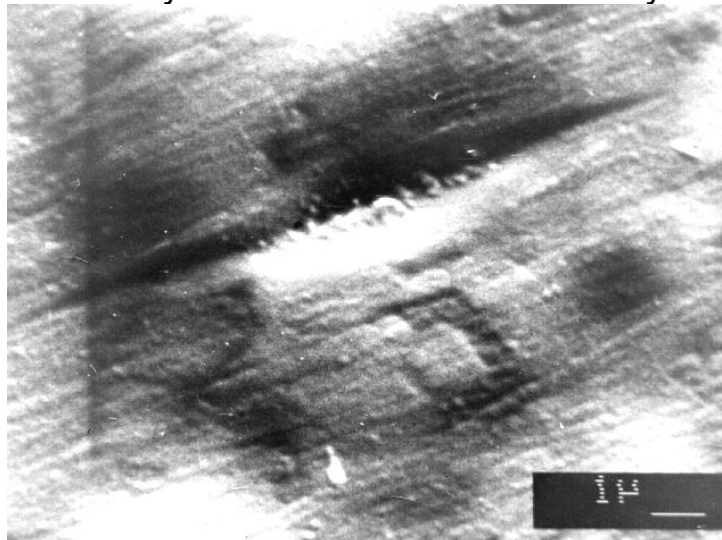


Рис. 3. Вид отпечатка индентора Кнупа при измерении микротвердости тонкопленочного упрочняющего покрытия на образце ВК17 ($\times 10000$)

Для оценки адгезионных свойств наносимых плазменных пленочных покрытий применялась методика Тольяттинского политехнического института (принятая, в частности, на Волжском автозаводе). При данной методике образцы с нанесенным

покрытием царапаются алмазным индентором Роквелла при различных нагрузках и далее полученные царапины изучаются с помощью металлографического микроскопа. Нагрузка, при которой на краях царапины появляются сколы покрытия, считается критической и определяет адгезию покрытия. Для покрытий нитрида титана, полученных методом вакуумной ионно-плазменной технологии (КИБ) на установках типа «Булат», критическая нагрузка составляет 35 Н, а для пленочных упрочняющих покрытий, осажденных при атмосферном давлении с помощью дугового плазмотрона – 65 Н, что свидетельствует о высокой адгезии покрытия, полученного методом ФПУ с использованием дугового плазмотрона.

Контрольная оценка толщины наносимого при ФПУ покрытия, проводилась в Петербургском институте ядерной физики им. Б.П.Константинова РАН с использованием голографического цифрового длинномера ДГ-100, предназначенного для прецизионных измерений с использованием линейных датчиков с точностью измерений $\pm 0,05$ мкм. При этом покрытие наносилось на одну из сторон плоскопараллельных плиток размером 10x35x100, изготовленных из твердого сплава, через специальную маску, обеспечивающую нанесение покрытия только на пятне диаметром 7 мм. Измерение осуществлялось путем установки датчика длинномера в центре пятна покрытия и на исходной поверхности, расположенной во время ФПУ под маской. Разность между этими значениями соответствует толщине покрытия (табл. 1).

Таблица 1. Толщина покрытия в зависимости от длительности процесса ФПУ

Время ФПУ, с	3	8	14	22	40
Толщина покрытия, мкм	0,03	0,09	0,1	0,2	0,4

Микротвердость поверхности с покрытием определялась с помощью прибора ПМТ-3 (по ГОСТ 9450-80), а также – на микротвердомере МНТ-10 (фирмы Anton Paar GmbH) с видеоизмерительной системой для световых микроскопов с увеличением $\times 1700$, вдавливанием алмазного индентора Кнупа (имеющего вид пирамиды, две противоположенные грани которой образуют угол 130° , а две другие $172^\circ 30'$).

Термическое воздействие плазменной струи дугового плазмотрона в процессе нанесения пленочного покрытия на предварительно закаленное изделие может привести к изменению структуры в поверхностных слоях основы, которые в общем случае можно разделить на три характерных участка (Рис. 4) [2]:

1) Участок повторной (поверхностной) закалки с высокой твердостью. Рентгеноструктурный анализ показывает, что содержание остаточного аустенита в стали X12M возрастает с 10-12 % до 20-25 %. Сохранение высокой твердости при увеличении содержания остаточного аустенита характерно для процессов скоростной поверхностной закалки (лазерной, электронно-лучевой, плазменной) [3] и свидетельствует о высокой степени искаженности структуры.

2) Участок кратковременного отпуска с пониженной твердостью. Наличие этого слоя способствует релаксации напряжений, позволяет избежать закалочных трещин и повышает работоспособность слоя повторной закалки.

3) Участок первичной (объемной) закалки, в котором малая величина нагрева не приводит к снижению твердости, достигнутой после предварительной объемной закалки изделия.

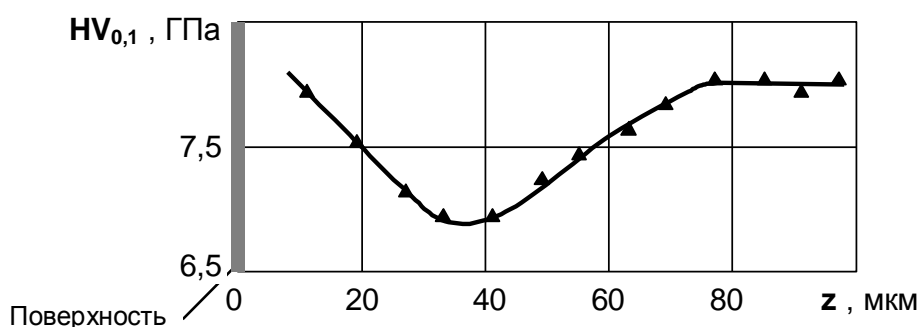


Рис. 4. Изменение микротвердости по глубине зоны термического влияния плазменной струи в предварительно закаленном образце из стали X12M при жестком режиме ФПУ

Аналогичное распределение микротвердости по глубине ЗТВ и структура поверхностных слоев характерны для способов скоростной закалки поверхности – ТВЧ, лазером, электронным лучом, сжатой дугой.

Сравнение микротвердости поверхностного слоя в стали после финишного плазменного упрочнения с нанесением пленочного покрытия (участок 1) и микротвердости композиции покрытие-подложка (при пониженных нагрузках на индентор) показывает, что основной вклад в повышение измеряемой микротвердости упрочненной поверхности вносит покрытие. Это закономерно, поскольку, как было показано ранее [2], насыщения подложки элементами, содержащимися в плазменной струе, не происходит. Следовательно, эффект финишного плазменного упрочнения

поверхности связан в первую очередь с нанесением тонкопленочного покрытия.

В технологии циклического нанесения покрытия важен выбор оптимальной длительности одного цикла обработки. Этот параметр режима существенно влияет на уровень нагрева поверхностных слоев подложки и самого наносимого покрытия, что, в свою очередь, сказывается и на свойствах подложки, и на условиях формирования покрытия.

С целью изучения влияния длительности цикла обработки $t_{\text{ц}}$ на характер изменения микротвердости композиции покрытие-подложка наносилось покрытие при различной длительности цикла $t_{\text{ц}}$ (5, 15, 30 и 60 с) на образцы из стали X12M, имеющие вид куба со стороной 20 мм, прошедшие предварительную закалку от 1000 °С и отпуск при 180 °С. Обрабатываемые образцы помещались в медную водоохлаждаемую оснастку для имитации теплового режима массивного изделия. Концентрация реагентов в плазменной струе в течение всего эксперимента поддерживалась постоянной. Обработка в каждом последующем цикле велась после полного остывания образца. Для каждого варианта обработки делались не менее 5-10 замеров микротвердости; при усреднении результатов измерений крайние значения не учитывались.

Как видно на полученных графиках (Рис. 5), по мере роста длительности обработки с увеличением толщины покрытия возрастает микротвердость композиции покрытие-подложка (в основном – за счет увеличения вклада покрытия).

Видно, что при одинаковом общем времени обработки большую микротвердость имеют образцы с меньшей длительностью единичного цикла $t_{\text{ц}}$. Это объясняется уменьшением скорости осаждения (конденсации) покрытия при увеличении температуры подложки и уже нанесенного покрытия, что имеет место при большем времени воздействия плазменной струи на образец в течение длинного цикла.

Таким образом, нанесение пленочного упрочняющего покрытия целесообразно проводить более короткими циклами. Принимая во внимание требования технологичности процесса, можно ориентироваться, например, на длительность цикла $t_{\text{ц}}$ порядка 15 с. В этом случае практически одинакового эффекта можно достичь за 5 циклов вместо 12 при $t_{\text{ц}} = 5$ с (Рис. 5).

Как показывают эксперименты, дальнейшее увеличение общего времени обработки сопровождается еще некоторым ростом микротвердости, который довольно быстро прекращается, и микротвердость достигает состояния «насыщения». Аналогичный

характер изменения микротвердости от толщины наносимого в вакууме покрытия нитрида титана наблюдался в работе [4].

Выбор рациональной толщины пленочного покрытия при финишном плазменном упрочнении должен учитывать также следующие факторы:

- покрытие толщиной более 3 мкм имеет большую шероховатость по сравнению с основой [2];

- покрытие большой толщины, имеющее низкую теплопроводность по сравнению с металлической подложкой, на тех же режимах ФПУ нагревается до более высоких температур, что уменьшает скорость осаждения (конденсации) покрытия;

- при продолжении обработки толстого покрытия начинает доминировать процесс гомогенного образования ультрадисперсных твердых частиц в газовой фазе и выпадением на поверхность изделия пылеобразного налета, затрудняющего формирование плотного пленочного покрытия;

- в покрытиях толщиной более 3-4 мкм иногда могут наблюдаться микротрещины, разделяющие покрытие на блоки размером порядка 150...300 мкм.

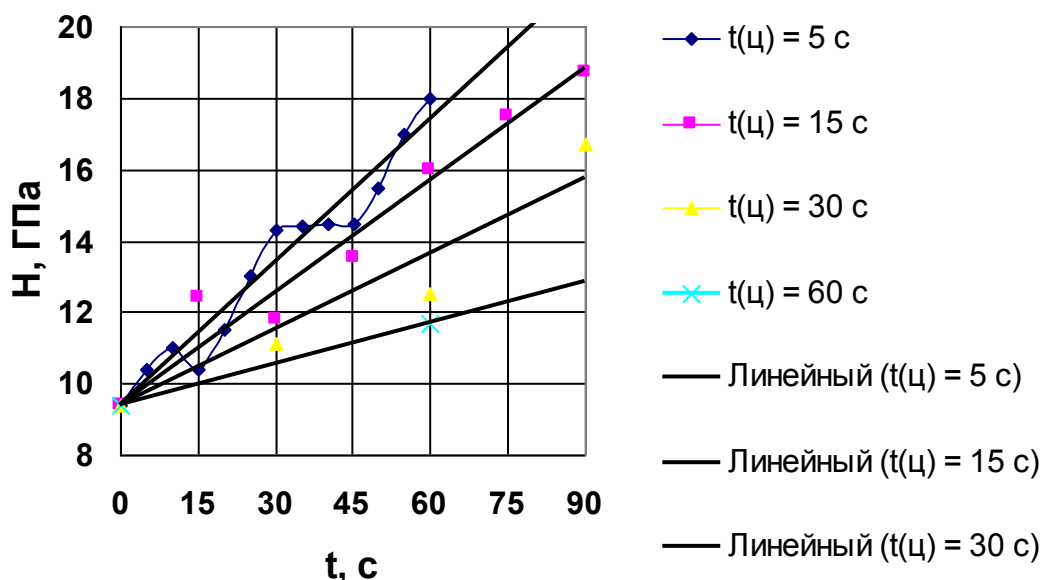


Рис. 5. Зависимость микротвердости композиции покрытие-подложка от длительности цикла $t_{ц}$ и общего времени нанесения покрытия

Следовательно, оптимальной толщиной пленочных покрытий, наносимых при финишном плазменном упрочнении, является 1...3 мкм, причём, как показало большое число производственных испытаний, покрытие даже минимальной толщины – 0,3...1 мкм – в

большинстве случаев дает упрочняющий результат, не намного отличающийся от покрытий большей толщины.

Процесс финишного плазменного упрочнения поверхности с одновременным нанесением тонкого пленочного покрытия при использовании дугового плазматрона отличается относительно высокой локальностью воздействия. Если сравнить распределение микротвердости композиции покрытие-подложка по радиусу неподвижного пятна нанесения покрытия с помощью высокочастотного и дугового плазматрона с плазмохимическим генератором НПХ-1, то можно получить представление о характере воздействия на упрочняемую поверхность при этих двух технологиях (Рис. 6). Эксперименты проводились на образцах из стали Х12М диаметром 120 мм толщиной 10 мм, прошедших предварительную закалку и имеющих исходную среднюю микротвердость 8,2 ГПа. Режимы обработки высокочастотным и дуговым плазматроном соответствовали оптимальным значениям.

Полученные зависимости близки к Гауссову нормальному распределению; при этом средний эффективный диаметр пятна упрочнения, оцениваемый по твердости композиции покрытие-подложка составляет:

- при использовании высокочастотного плазматрона – порядка 70 мм,
- при использовании дугового плазматрона с плазмохимическим генератором НПХ-1 – порядка 14 мм.

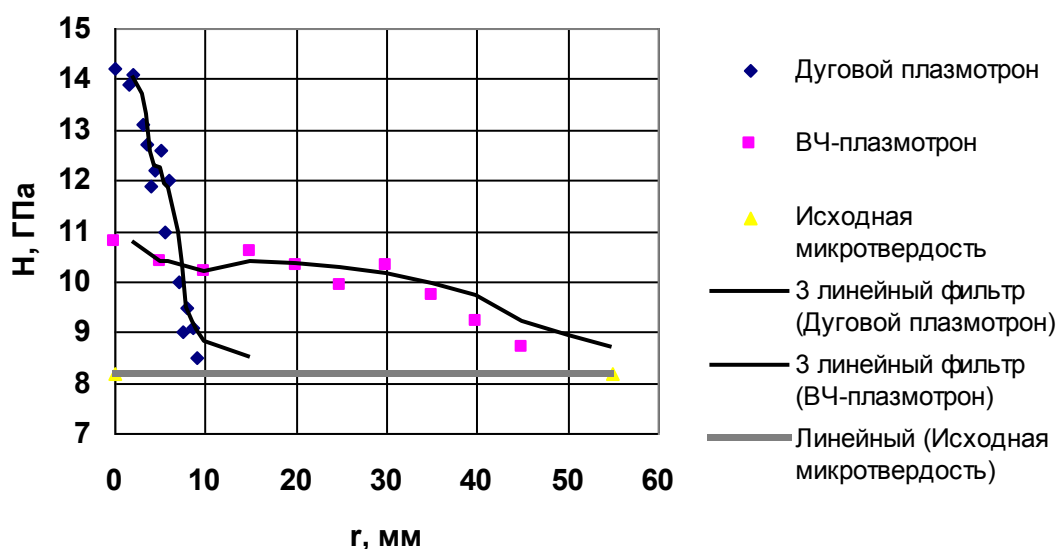


Рис. 6. Распределение микротвердости композиции покрытие-подложка по радиусу неподвижного пятна нанесения пленочного покрытия

Продолжая сравнение результатов упрочнения ВЧ и дуговым плазматроном, но уже при перемещении последнего со средней

скоростью 1,5 мм/с, получаем изменение микротвердости (Рис. 7) в зависимости –

а) от количества циклов при нанесении покрытия с помощью высокочастотного плазмотрона ($t_{ц} = 15$ с);

б) от числа проходов при обработке дуговым плазмотроном.

Повышение микротвердости за счет циклической обработки определяется как ростом толщины пленочного покрытия, так и влиянием структурных изменений в приповерхностном слое основы за счет повторных термических воздействий. Ограничение роста микротвердости композиции покрытие-подложка может быть связано, с одной стороны – с образованием более рыхлых слоев толстого покрытия с низкой когезионной прочностью сцепления, а с другой стороны – за счет окончания диффузионных процессов и стабилизации содержания высоколегированного остаточного аустенита в поверхностном слое [5].

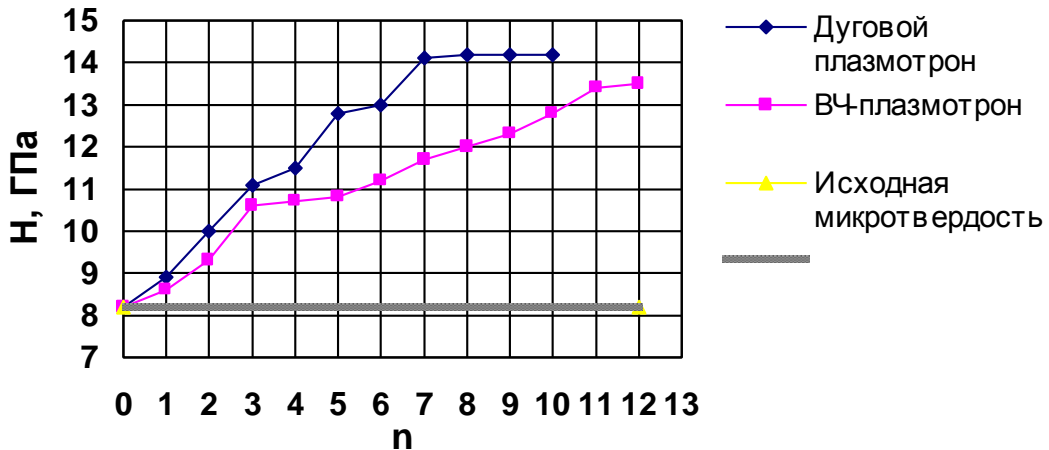


Рис. 7. Зависимость микротвердости композиции покрытие-подложка от числа циклов-проходов

Как видно на графиках, микротвердость при использовании дугового плазмотрона достигает насыщения за меньшее число циклов-проходов (7 против 11 для ВЧ-плазмотрона) и фактически, начиная с первого цикла-прохода, имеет более высокое значение (а особенно – начиная с 5-го цикла).

Для оценки влияния на микротвердость композиции покрытие-подложка регулирующих параметров технологического процесса финишного упрочнения (с применением для нанесения пленочного покрытия дугового плазмотрона) были поставлены несколько серий многофакторных экспериментов. В качестве имитаторов малогабаритной технологической оснастки, подвергаемой упрочнению, использовались предварительно закаленные (исходная микротвердость 8,2 ГПа) образцы из стали X12M

диаметром 15 мм и толщиной 5 мм. Образцы располагались в каждом цикле неподвижно под плазменной струей в течение времени цикла $t_{ц}$.

Чтобы оценить степень влияния факторов (параметров режима упрочнения) вне зависимости от величины интервалов варьирования полученные уравнения регрессии приводились к относительному виду[2].

Анализируя полученное усредненное уравнение регрессии (Рис. 8), можно выделить две группы регулирующих параметров режима:

- параметры, в основном, определяющие тепловложение в подложку – это дистанция обработки $l_{си}$, расход плазмообразующего газа $G_{пр}$ и ток сжатой дуги I ;
- параметры, влияющие на толщину наносимого покрытия – это расходы кремнийсодержащего $G_{к}$ и углеродсодержащего $G_{у}$ реагента, количество циклов-проходов n и длительность каждого цикла $t_{ц}$.

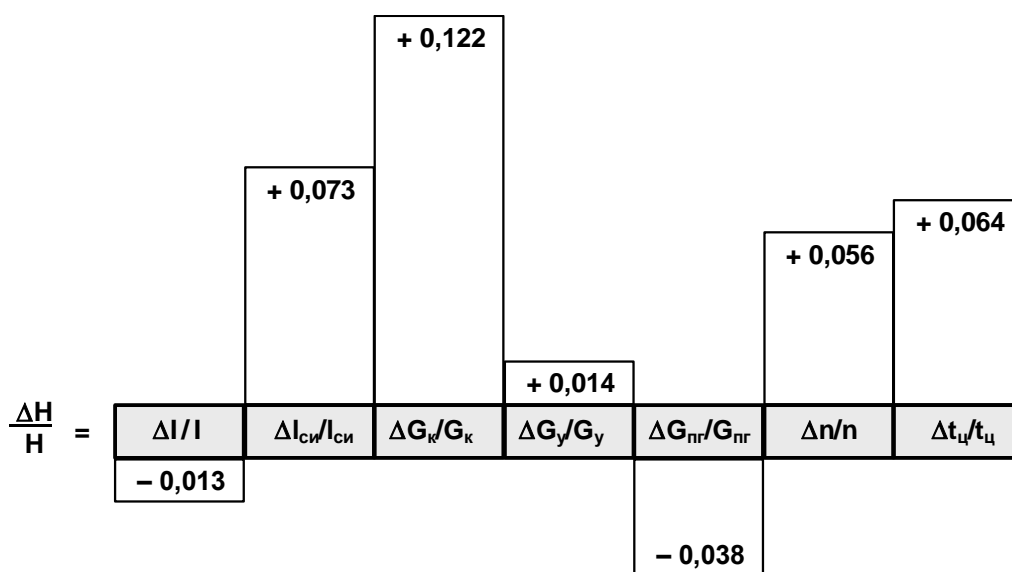


Рис. 8. Влияние параметров режима финишного плазменного упрочнения на микротвердость композиции покрытие-подложка

Микротвердость растет с уменьшением тока и расхода плазмообразующего газа и с увеличением дистанции обработки; все это уменьшает тепловложение в обрабатываемое изделие. Увеличение расхода кремнийсодержащего и углеродсодержащего реагента, количества циклов-проходов и длительности цикла (как уже выше обсуждалось, все это – в ограниченных пределах) способствует росту толщины покрытия и микротвердости композиции покрытие-подложка.

Сила влияния каждого из параметров технологического процесса на микротвердость пропорциональна коэффициентам регрессии уравнения, которое можно использовать для регулирования и оптимизации технологического процесса финишного плазменного упрочнения.

Как отмечалось ранее, основной вклад в повышение микротвердости композиции покрытие-подложка вносит наносимое пленочное покрытие. Принимая это во внимание, необходимо отметить, что, регулируя параметры режима в направлении уменьшения тепловложения в основу (с целью повышения микротвердости), фактически тем самым снижается температура обрабатываемой поверхности и ускоряется процесс осаждения (конденсации) покрытия на поверхности по гетерогенному механизму синтеза твердых продуктов плазмохимических реакций. Таким образом, параметры режима, в основном ответственные за нагрев изделия-подложки ($I_{\text{си}}$, $G_{\text{пг}}$, I), одновременно в не меньшей степени влияют и на рост толщины наносимого покрытия.

В то же время, необходимо учитывать важность процессов в поверхностном слое металла основы, вызванных его локальным нагревом плазменной струей дугового плазмотрона, что может привести к разупрочнению стальной подложки. Необходима достаточно достоверная информация о размерах и структуре различных участков (Рис. 4) в зоне термического влияния подложки. Задача осложняется исключительно малыми размерами этих участков. Вопросам исследования структур, образующихся в условиях больших скоростей нагрева и малого времени пребывания при высоких температурах, что характерно для современных поверхностных способов закалки (высокочастотной, лазерной и т.п.), посвящены работы В.П.Вологодина, И.Н.Кидина, Г.Ф.Головина, М.А.Криштала и других [3, 6-8].

Оценка и регулирование тепловой обстановки в тонких поверхностных слоях обрабатываемых изделий требуют, прежде всего, решения задачи управления энергетическими параметрами плазменной струи дугового плазмотрона в процессе финишного упрочнения поверхности с нанесением пленочного покрытия. Для характеристики плазменной струи как локального теплового источника достаточно трех параметров: эффективной мощности $Q_{\text{э}}$, эффективного радиуса пятна нагрева R_{q} и эффективного к.п.д. струи $\eta_{\text{э}}$.

Плоскостное зондирование плазменной струи проводилось с использованием методов планирования многофакторных экспериментов, что позволило исследовать влияние тока сжатой дуги I , дистанции обработки $I_{\text{си}}$ и расходов аргона –

плазмообразующего $G_{\text{пг}}$, фокусирующего $G_{\text{фг}}$ и защитного $G_{\text{зг}}$. В основной серии опытов с плазмохимическим генератором НПХ-1 бралась главная полуреплика 2^{5-1} (заданная генерирующим соотношением $x_5 = x_1 x_2 x_3 x_4$), имеющая высокую разрешающую способность. Нулевой уровень факторов и их интервалы варьирования приведены в таблице (Таблица 2). Полученные линейные уравнения регрессии приводились к относительному виду (в отклонениях). Параметрами оптимизации служили: $Q_{\text{э}}$, R_{q} , $\eta_{\text{э}}$.

Таблица 2. Коэффициенты уравнений регрессии для регулирования энергетических характеристик плазменной струи при финишном упрочнении поверхности с нанесением пленочного покрытия

Отклонение энергетических характеристик плазменной струи	Коэффициенты B_i при отклонении параметров режима:					Среднее значение
	$\Delta I / I$	$\Delta I_{\text{си}} / I_{\text{си}}$	$\Delta G_{\text{пг}} / G_{\text{пг}}$	$\Delta G_{\text{фг}} / G_{\text{фг}}$	$\Delta G_{\text{зг}} / G_{\text{зг}}$	
$\Delta Q_{\text{э}} / Q_{\text{э}}$	+ 0,92	- 0,34	+ 1,02	+ 0,53	- 0,43	327 Вт
$\Delta R_{\text{q}} / R_{\text{q}}$	- 0,29	+ 0,27	- 0,12	- 0,17	+ 0,22	8,0 мм
$\Delta \eta_{\text{э}} / \eta_{\text{э}}$	- 0,36	- 0,37	+ 1,03	+ 0,44	- 0,50	6,4 %
Нулевой уровень факторов	160 А	10 мм	2,5 л/мин	1,3 л/мин	12,6 л/мин	X_{0j}
Интервал варьирования	40 А	5 мм	0,8 л/мин	0,9 л/мин	4,5 л/мин	ε_j

Как следует из полученных уравнений регрессии, наиболее чувствительной характеристикой плазменной струи при финишном плазменном упрочнении является эффективная мощность, изменяющаяся более, чем на порядок в исследованной области, а эффективный радиус пятна нагрева при этом изменяется в 2,5 раза. Сильное влияние на $Q_{\text{э}}$ оказывают ток сжатой дуги и расход плазмообразующего газа, как и при обработке изделий дугой прямого действия. С увеличением тока уменьшается эффективный к.п.д. плазменной струи.

В отсутствии потока защитного газа опыты показали, что с увеличением дистанции обработки уменьшается эффективный радиус, а это (наряду с другими показателями) указывает на возрастание подсоса воздуха в плазменную струю. Организация

газовой защиты плазменной струи позволяет реализовать при необходимости режимы с малым тепловложением в обрабатываемое изделие и с рассредоточением теплового потока, т.е. с бóльшим эффективным радиусом. Как видно из таблицы (Таблица 2), с этой целью можно уменьшать ток при увеличении дистанции обработки и расхода защитного газа.

Статистическая обработка результатов многофакторных экспериментов показала, что вклад двойных взаимодействий в уравнения регрессии невелик: для основных влияющих факторов (имеющих наибольшие коэффициенты регрессии при линейных членах) вклад двойных взаимодействий в среднем в 5 раз слабее, чем вклад линейных членов. Таким образом, с точки зрения управления процессом финишного плазменного упрочнения, для отклонений параметров режима соизмеримых с интервалом варьирования (или меньших) можно всеми двойными взаимодействиями пренебречь без существенной потери точности.

Предложенная методика обработки и обобщения результатов многофакторных экспериментов в относительном виде дает возможность:

- в компактном виде с необходимой точностью обобщить энергетические характеристики плазменной струи в достаточной для регулирования области варьирования параметрами режимов;
- использовать полученную информацию как для расчетов технологических процессов плазменной закалки и нанесения тонкопленочных упрочняющих покрытий, так и для определения требований к оборудованию.

Полученные количественные характеристики основных энергетических параметров плазменной струи позволяют рассчитать температурные поля в изделии и произвести подбор оптимальных режимов обработки. Особенностью данной задачи для финишного плазменного упрочнения являются:

- сравнительно высокая концентрация энергии и относительно небольшие размеры пятна нагрева при малых значениях эффективной мощности;
- минимальная протяженность по глубине основы зон термического влияния;
- как правило, ограниченные размеры обрабатываемого тела;
- конечное время действия источника нагрева при циклической обработке;
- зависимость теплофизических свойств обрабатываемых материалов от температуры.

Эти и другие особенности указывают на необходимость решения нестационарной нелинейной задачи теплопроводности с применением численных методов расчета. Поставленная задача решалась в двумерной осесимметричной постановке с использованием метода конечных элементов (МКЭ) [9,10].

Для расчетов в качестве имитаторов обрабатываемого изделия были выбраны цилиндрические образцы из стали X12M диаметром 24 мм и высотой 30 мм с заданной начальной температурой 20 °С. Конечные элементы принимались как кольца, имеющие в поперечном сечении вид треугольника. Для повышения точности расчета (лучшей аппроксимации функции $T(x,y)$) в области высоких градиентов температуры размеры элементов уменьшались.

Определенные по результатам плоскостного зондирования плазменной струи значения эффективного радиуса пятна нагрева R_q и эффективной мощности $Q_э$ использовались при расчете в составе исходных данных как характеристики поверхностного источника нагрева. В предварительном расчете оценивались термические циклы для существенно различающихся значений R_q и $Q_э$ из исследованной области и для одного промежуточного (для $Q_э$) (Таблица 3).

Таблица 3. Варианты режимов и граничных условий при расчете термических циклов (Рис. 9)

Вариант	$Q_э$, Вт	R_q , мм	Граничные условия
1	900	6	Адиабатические
2	900	6	Изотермические
3	300	6	Адиабатические
4	300	6	Изотермические
5	300	10	Адиабатические
6	60	10	Адиабатические

Как показали проведенные совместно с Д.Ю.Райчуком расчеты, уже после пятой секунды нагрева плазменной струей температурная обстановка в образцах близка к квазистационарной, что особенно заметно при изотермических граничных условиях (Рис. 9). Изотермические граничные условия моделируют изделия сравнительно больших габаритов, в то время как адиабатические – изделия малых размеров. В зависимости от параметров плазменной струи возможна закалка рассматриваемого поверхностного слоя, разупрочняющий отпуск или отсутствие в этой зоне структурных изменений. Скорости охлаждения нагретого слоя могут значительно превышать критические скорости охлаждения для закалки на мартенсит стали X12M [11].

При неподвижном пятне нагрева дуговым плазматроном температура поверхности в центре пятна уже на 5 секунде может превышать 200-250 °С, что для многих сталей будет выше температуры отпуска. Проведенные эксперименты подтвердили снижение микротвердости в центре неподвижного пятна на стали ШХ15СГ. Движение плазменной струи с теми же параметрами нагрева (эффективными мощностью и радиусом) и для тех же изделий уже на скорости 3 мм/с приведет к нагреву поверхности максимум до 140 °С. Таким образом, важным условием проведения ФПУ на мягких режимах с минимальным термическим воздействием на основу является перемещение плазматрона и тем самым – многоцикловый процесс нанесения упрочняющего покрытия (при необходимости – с промежуточными охлаждениями изделия).

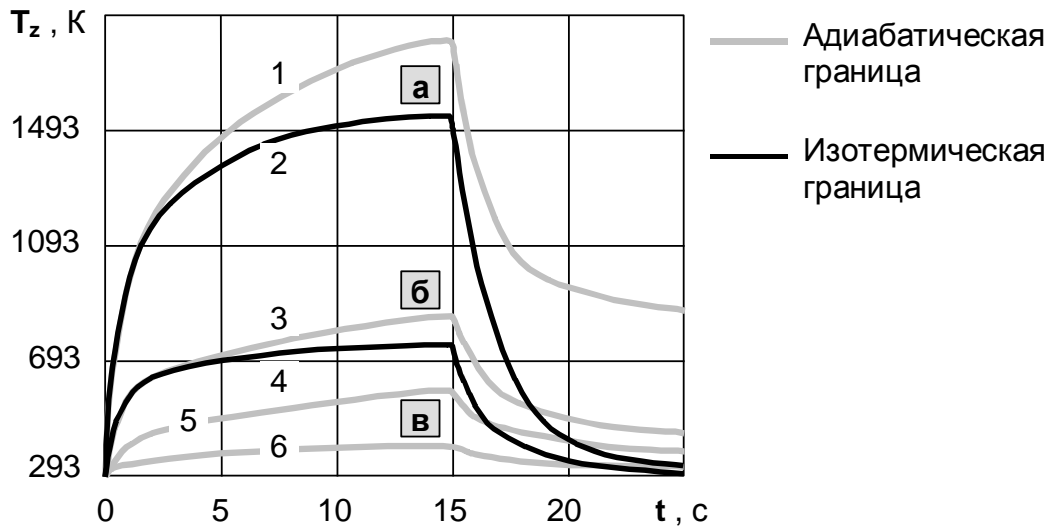


Рис. 9. Зависимости $T_z(t)$ по оси плазменной струи в элементе на средней глубине 25 мкм от поверхности образца из стали X12M при времени цикла 15 с; режим закалки (а), режим отпуска (б), режим отсутствия структурных превращений в данной зоне (в)

Осуществление процесса финишного плазменного упрочнения (ФПУ) на жестких режимах имеет определенные ограничения – достаточно надежно (без опасности разупрочнения поверхностного слоя) режимы с повторной закалкой поверхности могут быть реализованы в основном на массивных изделиях с развитыми упрочняемыми поверхностями. В то же время, как уже отмечалось выше, нанесение плотного пленочного покрытия возможно на мягких режимах с ограниченным тепловложением, не приводящим к структурным изменениям в основе. Это особенно актуально для всевозможного режущего инструмента и технологической оснастки.

Примером формализованного выбора оптимальных режимов финишного плазменного упрочнения с нанесением пленочного покрытия может служить разработанный алгоритм выбора параметров ФПУ (Рис. 10), в котором были также учтены многочисленные статистические результаты производственных испытаний упрочненных изделий на десятках отечественных и зарубежных предприятиях.

В данном алгоритме рассчитываются производительность ФПУ P , общее время ФПУ t_0 , число полных N и локальных M проходов плазмотрона и другие параметры.

Установка тока, расходов газов и дистанции обработки осуществляется по рекомендациям, выработанным на основании описанных ранее зависимостей (Рис. 8, Таблица 2).

Принятые в алгоритме определения:

- S_p – расчетная площадь поверхности, подлежащая ФПУ (может быть равна или больше – для мелких деталей и инструмента – реальной площади поверхности, подлежащей ФПУ), мм^2 ;

- слой покрытия – это покрытие, полученное при ФПУ в результате воздействия плазмы на поверхность S_p в течение времени одного полного прохода (цикла) t_n с производительностью P ;

- t_0 – общее время воздействия плазмы на поверхность при ФПУ в течение всех полных проходов (циклов) (без учета времени промежуточного охлаждения упрочняемого изделия), с ;

- P – производительность ФПУ – это расчетная площадь поверхности, на которую при ФПУ наносится покрытие расчетной толщины F в течение 1 секунды, $\text{мм}^2/\text{с}$;

- полоса ФПУ – это поверхность, на которой формируется упрочняющее покрытие расчетной ширины 8 мм при перемещении плазмотрона с расчетной скоростью v ;

- L – общая длина одного полного прохода полосы ФПУ шириной 8 мм – это полный путь плазмотрона при ФПУ при нанесении 1 слоя покрытия, мм ;

- t_n – время одного полного прохода – это время движения плазмотрона со скоростью v вдоль всей полосы ФПУ длиной L (т.е. полное время одного цикла), с ;

- N – число полных проходов – это число слоев покрытия (число циклов);

- l – длина локального участка – это часть длины полного прохода (полосы ФПУ шириной 8 мм), удобная для непрерывного перемещения плазмотрона при ФПУ на данном участке (например, – периметр режущих кромок вырубного штампа, одна из сторон

развитой упрочняемой поверхности, длина одного лезвия, длина окружности цилиндрической поверхности тел вращения и т.п.), мм ;

- K – число локальных участков – это, например, число лезвий инструмента, упрочняемых отдельными локальными проходами плазмотрона, или число локальных полос шириной 8 мм и длиной l на площади S_p ;

- M – число локальных проходов (перемещений) – это общее число локальных перемещений плазмотрона при ФПУ на длине участков l за все общее время t_0 ФПУ.

При использовании алгоритма для соответствующих групп (типов) упрочняемых изделий выбираются: типовая модель расчета, толщина покрытия F , скорость перемещения плазмотрона v (с учетом рекомендаций алгоритма и характеристик оборудования) (Таблица 4, табл.5, табл. 6).

Сам алгоритм в виде блок-схемы с общими расчетными формулами приведен ниже (Рис. 10).

Рассмотрим примеры расчета параметров режима финишного плазменного упрочнения для различных моделей расчета (табл.6):

1. Вырубной пуансон

Упрочняются режущие кромки

Периметр кромок – l .

$H = 8$ мм – в общем случае. $H = (3...5) \cdot b$ – для боковых поверхностей режущей кромки, где b – толщина вырубаемого листа. Если $5b < 8$ мм, то принимается $H = 8$ мм.

2. Формообразующий штамп или прессформа

Поверхность S рассчитывается геометрически.

3. Фреза (четырёхлезвийная)

Число K определяется числом лезвий n .

Если $8 \cdot n \geq 3,14 \cdot d$, то принимается $S_p = 3,14 \cdot d \cdot l$; (при этом $K = 3,14 \cdot d / 8$ с округлением до большего целого). В обоих случаях, если $l \leq 8$ мм, то принимается $l = 8$ мм.

Для торцевой поверхности при $8 \cdot n \geq 0,25 \cdot 3,14 \cdot d^2$ принимается

$$S_{\text{торц}} = 0,25 \cdot 3,14 \cdot d^2 .$$

4. Развертка (многолезвийная)

Каждый локальный участок упрочняется при локальном повороте на угол $360^\circ / K$.

5. Вал и т.п.

Валы, а также цилиндрический инструмент (развертки, сверла малого диаметра, метчики и т.п.) обычно вращаются при ФПУ, что позволяет вести процесс ФПУ по винтовой линии с шагом 8 мм, осевой скоростью v_x и временем одного оборота $t_{об}$.

6. Мелкий инструмент (сверла, метчики и т.п. изделия)

При диаметрах упрочняемой цилиндрической части менее 6 мм целесообразна групповая обработка инструмента, например, при расположении упрочняемых изделий по окружности приспособления диаметром D . Поворот инструмента может быть ручной однократный на 180° или возможно постоянное вращение инструмента вокруг собственной оси (с учетом необходимого обеспечения воздействия плазмы на все стороны упрочняемых поверхностей).

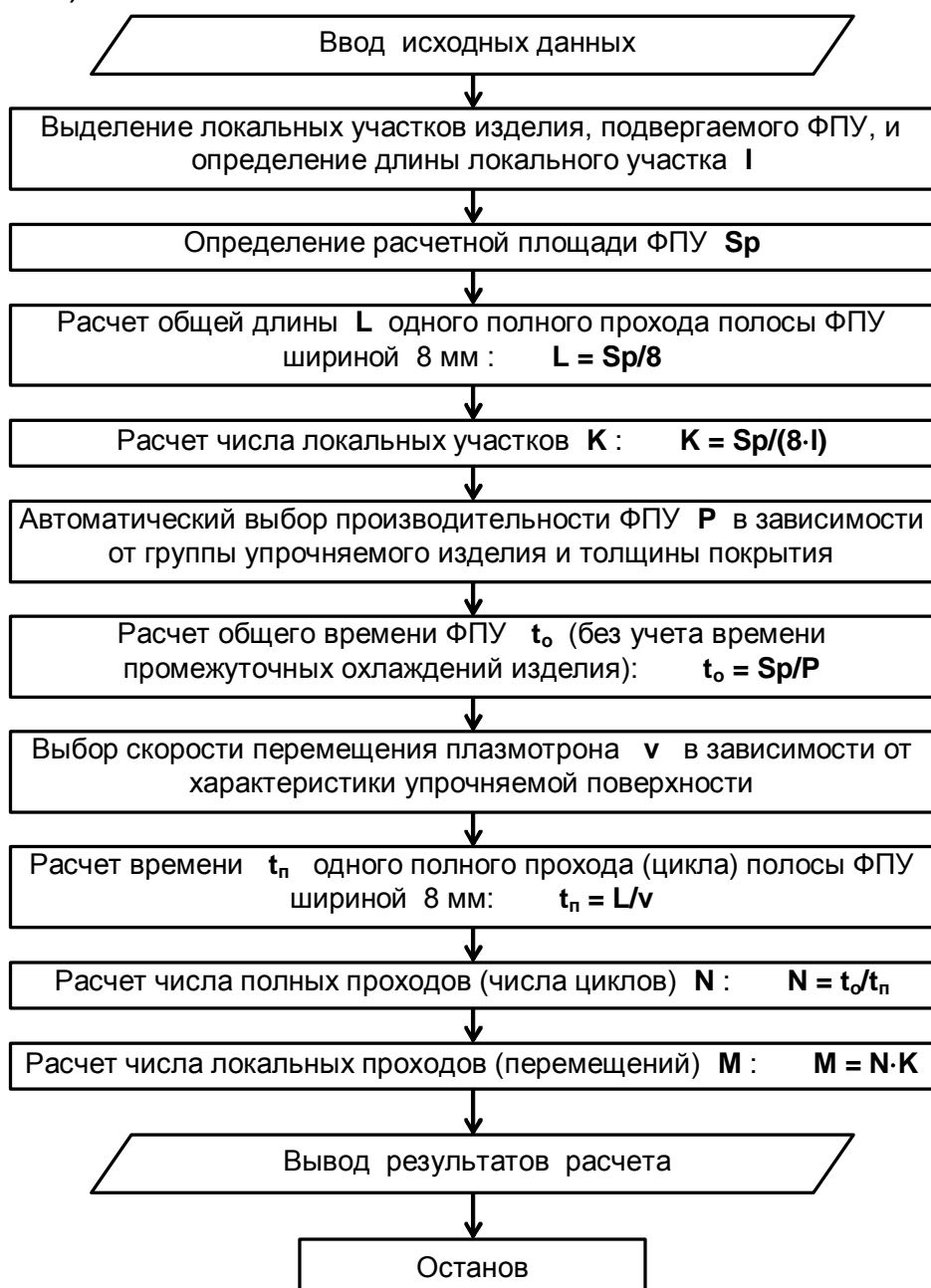


Рис. 10. Обобщенная блок-схема расчета режимов финишного плазменного упрочнения

7. Штемпель и другие изделия с круглой поверхностью

По заданному диаметру поверхности рассчитывается радиус R и время t обработки каждого кольца упрочнения. При этом обеспечивается максимальная равномерность толщины покрытия на всей площади круга.

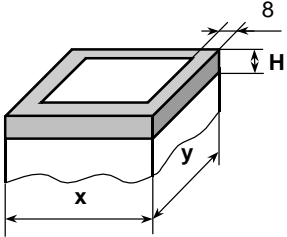
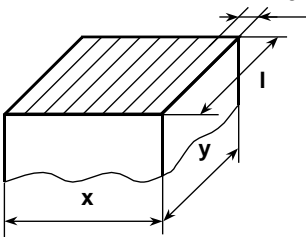
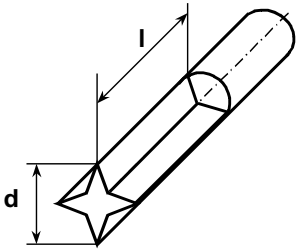
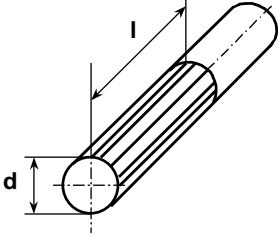
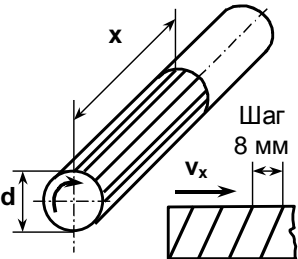
Таблица 4. Толщина покрытия и производительность финишного плазменного упрочнения

Группы изделий	Толщина покрытия, мкм	Производительность процесса P , мм ² /с
Беззазорные штампы, режущий инструмент с тонкими лезвиями	0,5...0,7	4...2,9
Типовой режущий инструмент и штамповая оснастка	0,5...1,5	10...1,3
Прессформы для литья металлов под давлением	2,0...2,5	2,5...0,8

Таблица 5. Рекомендуемые скорости перемещения плазмотрона

№	Характеристики упрочняемых поверхностей		Скорости перемещения ^{*)} v , мм/с
1	Поверхности массивных изделий (формообразующих штампов, литейных прессформ, и т.п.)	Развитые поверхности	3...10
2	Режущие кромки вырубных штампов и крупногабаритного режущего инструмента	Угол режущей кромки $\geq 90^\circ$	7...10
3	Поверхности режущего инструмента с тонкими режущими кромками	Угол режущей кромки $< 90^\circ$ или тонкое сечение лезвия	30...40
<p>^{*)} – максимальная скорость перемещения не должна превышать 150 мм/с, что обусловлено газодинамическими процессами взаимодействия плазменной струи и обрабатываемой поверхности.</p>			

Таблица 6. Типовые модели и их основные расчетные соотношения

№	Наименование	Пример типовой модели	Основные формулы
1	Вырубной штамп		$l = 2 \cdot x + 2 \cdot y$ $S = 8 \cdot l + H \cdot l$ $L = 2 \cdot l$ $K = S / (8 \cdot l)$ $(K = 16 \cdot l / (8 \cdot l) = 2$ при $H = 8$) Если K не целое, то $S_p > S$
2	Формообразующий штамп или прессформа		$l = y$ $S = x \cdot y$ $L = S / 8$ $K = S / (8 \cdot l) = x / 8$ Если K не целое, то $S_p > S$
3	Фреза (четырёхлезвийная)		<u>$d \geq 8 \text{ мм}$</u> l – длина лезвия n – число лезвий $K = n$ $S = 8 \cdot K \cdot l$ $L = S / 8 = K \cdot l$
4	Развертка (многолезвийная)		а) <u>$d \geq 6 \text{ мм}$</u> l – длина цилиндрической части $S = 3,14 \cdot d \cdot l$ $L = S / 8$ $K = S / (8 \cdot l) = 3,14 \cdot d / 8$ б) <u>$d < 6 \text{ мм}$</u> $S = 2 \cdot 8 \cdot l$ $K = 2$
5	Вал и т.п.		$l = 3,14 \cdot d$ $S = 3,14 \cdot d \cdot x$ $L = S / 8$ $K = S / (8 \cdot l) = x / 8$ Если v_x задана, то время 1 оборота: $t_{об} = 8 / v_x$ ($t_{об} \leq 1 \text{ с}$);

№	Наименование	Пример типовой модели	Основные формулы
			$v = 3,14 \cdot d / t_{об}$ $(v \leq 150 \text{ мм/с})$
6	Мелкий инструмент (сверла, метчики и т.п.)		$d < 6 \text{ мм}$ $S = 2 \cdot 3,14 \cdot D \cdot l$ (с учетом поворота инструмента) $K = S / (8 \cdot l) = 3,14 \cdot D / 4$
7	Изделие с упрочняемой поверхностью в виде круга		$R1 = 10 \text{ мм}$ $b = 12 \text{ мм}$ Число колец К: $K \geq ((R_{кр} - 10) / 12)$ +1К берется большее целое; $S_p = \pi \cdot ((K - 1) \cdot 12 + 16)^2$ Время обработки колец $t_1 = 50 \cdot F / 0,3$ $t_i = t_1 \cdot (R_i - 1) / 10$

Выбираемые по описанному алгоритму режимы финишного плазменного упрочнения реализуют основные отличительные особенности данной технологии ФПУ:

- процесс используется как последняя финишная операция вследствие формирования тонкоплёночного покрытия (толщиной не более 3 мкм), укладываемого в поля допусков на размеры обрабатываемых изделий;
- отсутствуют изменения класса шероховатости любой поверхности после финишного плазменного упрочнения;
- минимальный локальный и интегральный нагрев изделия в процессе ФПУ (как правило, не более, чем на 100-120 °С) не вызывает деформаций деталей, а также позволяет производить упрочнение инструментальных сталей с низкой температурой отпуска;
- процесс финишного плазменного упрочнения, проводимый на воздухе при температуре окружающей среды, не требует вакуумных или других камер, ванн и даёт возможность упрочнять рабочие поверхности изделий любых габаритов;
- высокая экономичность технологии (расход аргона не превышает 5-7 л/мин; расход жидких препаратов упрочнения –

менее 0,5 г/час; потребляемая электрическая мощность – не более 6 кВт);

- экологическая чистота процесса;
- износостойкость изделий после ФПУ возрастает в 2-6 и более раз (табл. 7).

ВЫВОДЫ:

1. Осуществление процесса финишного плазменного упрочнения (ФПУ) с использованием дугового плазмотрона на жестких режимах имеет определенные ограничения – достаточно надежно (без опасности разупрочнения поверхностного слоя) режимы с повторной закалкой поверхности могут быть реализованы в основном на массивных изделиях с развитыми упрочняемыми поверхностями при механизированном перемещении плазмотрона или изделия.

2. Нанесение плотного пленочного покрытия возможно на мягких режимах с ограниченным тепловложением, не приводящим к структурным изменениям в основе, что особенно актуально для всевозможного режущего инструмента и технологической оснастки, в том числе – при ручном проведении процесса ФПУ.

3. Микротвердость поверхности с покрытием необходимо оценивать при минимальной нагрузке на индентор – от 2 гс и менее. При нагрузке 2 гс типичная микротвердость композиции покрытие-подложка составляет 14...24 ГПа; при нагрузке 0,5 гс и менее максимальная твердость покрытия достигает величины порядка 52 ГПа.

4. Важным условием проведения ФПУ на мягких режимах с минимальным термическим воздействием на основу является перемещение плазмотрона на скоростях больших 3 мм/с и, тем самым, – многоцикловый процесс нанесения упрочняющего покрытия (при необходимости – с промежуточными охлаждениями изделия).

5. При циклическом нанесении пленочного покрытия для одинакового общего времени обработки бóльшая микротвердость композиции покрытие-подложка наблюдается для более короткого времени единичного цикла (5...15 с), уменьшающего разогрев основы, что соответствует повышенным скоростям перемещения плазмотрона или изделия.

6. Использование разработанного алгоритма и соответствующей компьютерной программы для определения параметров ФПУ обеспечивает получение покрытия заданной толщины с максимальной равномерностью толщины и твердости на всей поверхности упрочнения.

Таблица 7. Производственные испытания изделий после финишного плазменного упрочнения на мягких режимах с минимальным термическим воздействием на основу

Изделие	Материал изделия	Материал обрабатываемой заготовки	Относительное повышение стойкости	Организация, проводившая испытания
Штамп вырубки и пробивки	X12M	Ст65Г	3,4	«ГАЗ», Нижний Новгород
Штамп вырубной	X12M	Ст10	6,0	«Ленмедап», Санкт-Петербург
Штемпель чеканочный	X12M	ЛМц58-2	2,5	«Монетный двор», Санкт-Петербург
Штамп гибочный	У10	Медь М1	6,0	«Электросила», Санкт-Петербург
Штамп развальцовочный	X12MФ	Ст65Г	4,4	«АвтоВАЗ», Тольятти
Штамп вытяжной	ХВГ	Д16Т	3,0	«Дзинтарс», Рига
Литейная форма	4Х5МФС	ЛЦ16К4	13,0	Саранский приборостроит. завод, Саранск
Нож прессножниц	9ХС	45Г17Ю3	2,6	«Электросила», Санкт-Петербург
Нож кожевенный	ХВГ	кожа	2,5	«А.Радищев», Санкт-Петербург
Сверло Ø3,0	P6M5	ВЧ 70	5,75	«Моторостроительный завод», Харьков
Сверло Ø4,2	P6M5	12ХН3А	5,0	«Завод технологической оснастки», Николаев
Сверло Ø5	P6M5	АК7	13,6	«Топливные системы», Санкт-Петербург
Сверло Ø8,9	P6M5	Ст45	4,0	«Турбомеханический завод», Полтава
Сверло ступенчатое Ø13/24	P6M5	Ст20	6,6	Омутнинский металлургический завод, Омутнинск
Метчик М8	P6M5	Ст40Х	3,0	Морской завод, Кронштадт
Метчик М16	P6M5	Ст35Л	10,0	«Вагоностроительный завод», Усть-Катав
Метчик М 24	P6M5	40Х	3,0	«Калужский турбинный завод», Калуга
Развертка Ø8	P6M5	Al-Si	6,5	«Прогресс», Санкт-Петербург
Развертка Ø14	P6M5	У8А	2,25	«Царскосельский завод», Пушкин
Развертка Ø20	P6M5	Ст40Х	2,4	«Киевтрактородеталь», Киев
Твердосплавные пластины	ВК6	Ст25Л	10,0	«Знамя Труда», Санкт-Петербург
Фреза концевая Ø10	P6M5	Х12	4,1	НПО им. Коминтерна, Санкт-Петербург
Фреза концевая Ø10	тв.сплав ДК460UF	12Х13	2,0	«Калужский турбинный завод», Калуга
Фреза шпоночная Ø12	P6M5	Ст45	2,4	«Царскосельский завод», Пушкин
Фреза фасонная	P6M5	Ст АС-14	3,0	Автоагрегатный завод, Дмитровград
Фреза дисковая Ø120x5,04	P6M5	Ст20	5,2	«Омутнинский металлургический завод», Омутнинск
Фреза чистовая	P18	СтР2МА (241 НВ)	2,0	«Ленинградский металлический завод», Санкт-Петербург
Зенкер	P6M5	Ст45	2,0	Морской завод, Кронштадт
Резец фасонный круглый	P6M5	СЧ20	2,7	«Моторный завод», Ульяновск
Резец фасонный	T15K6	АК7	2,0	«Топливные системы», Санкт-Петербург
Резец отрезной	P6M5	Ст45	8,0	Морской завод, Кронштадт
Резец канавочный	P6M5	Ст45	2,5	«Промтрактор», Чебоксары

Литература

1. Научные основы материаловедения. Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. – Изд. МГТУ. - М. - 1994. – 366 с.
2. Соснин Н.А., Тополянский П.А., Вичик Б.Л. Плазменные покрытия (технология и оборудование).- СПб: Знание. 1992.- 28 с.
3. Криштал М.А., Жуков А.А., Кокора А.Н. Структура и свойства сплавов, обработанных излучением лазера.- Metallurgia. - М.- 1973. - 192 с.
4. Береснев В.М., Борушко М.С., Любченко А.П. и др. Плазменная конденсация нитрида титана на сталь Р18 и твердый сплав Т14К8. Электронная обработка материалов. - 1979. - № 3. - С.14-16
5. Тополянский П.А., Соснин Н.А. Упрочнение деталей, технологической оснастки и инструмента с помощью дуговой и высокочастотной плазмы. Электротехническое производство. Научно-технические достижения и передовой опыт. - 1991. - № 2. - С.24-27
6. Вологдин В.П. Поверхностная закалка индукционным способом. Metallurgizdat. - М. - 1939. -153 с.
7. Кидин И.Н. Термическая обработка стали при индукционном нагреве. Metallurgizdat. - М. - 1950. - 317 с.
8. Головин Г.Ф., Замятнин М.М. Высокочастотная термическая обработка. Машиностроение. - Л. - 1968.-239 с.
9. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. Мир. - М. - 1979. - 392 с.
10. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. Изд. Metallurgia. - М. - 1983. - 527 с.