

Для захлаживания таких слитков вместо утепляющей прибыльной надставки следует использовать нефутерованную надставку-холодильник, позволяющую формировать слиток с сосредоточенной вдоль оси усадочной раковины.

Результаты исследования показали, что замена футерованной прибыльной надставки надставкой-холодильником сокращает время затвердевания слитка, в результате чего металл слитка обладает повышенной химической однородностью. Это способствует повышению в 1,1...1,4 раза стабильности показателей механических свойств металла полых поковок.

Установлено, что замена обрательной конусности слитка с захлаженной верхней частью на прямую, достигаемое путем переворота изложницы, уменьшает

относительный диаметр усадочной раковины в теле слитка в среднем на 8 %.

Использование слитков с захлаженной верхней частью позволило увеличить выход годного металла слитка при производстве полых поковок в среднем на 7,2 %, обеспечило экономию теплоизоляционных материалов прибыльных надставок, снизило трудоемкость подготовки литейной оснастки и расход газа на нагрев слитков перед ковкой. Технология отливки слитков с захлаженной верхней частью не требует применения специального парка изложниц.

Библиографический список

1. Ефимов В. А. Разливка и кристаллизация стали. — М: Металлургия, 1976. — 556 с.
2. Жульев С. И. Удлиненные кузнечные слитки // Разливка стали в слитки: Сб. науч. тр. АН УССР,

Ин-т пробл. литья. — Киев, 1987. — С. 81—83.

3. Оптимизация производства поковок за счет разработки геометрии бесприбыльных кузнечных слитков / М. В. Колодкин, Д. В. Рущкий, С. И. Жульев // Изв. ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. Вып. 2: межвуз. сб. науч. ст./ответ. ред. Ю. П. Трыков; ВолгГТУ. — 2008. — № 10 (48). — С. 162—164.

4. Результаты моделирования напряженного состояния стальных слитков при затвердевании / С. И. Жульев, Е. И. Бузинов, К. Ю. Бод. и др. // Сталь. — 2006. — № 7. — С. 20—22.

5. Математическое моделирование тепловых процессов в ходе затвердевания крупного стального слитка / В. П. Багмутов, И. Н. Захаров // Сталь. — 2006. — № 3. С. 28—33.

6. Проектирование кузнечных слитков на ОАО «Буммаш» / С. И. Жульев, М. В. Колодкин // Вестник Удмуртского Университета. Вып. 1. Физика. Химия. Ижевск: УдГУ, 2008. — С. 101—106.

УДК 621.793

П. А. Тополянский, канд. техн. наук; **С. А. Ермаков**, канд. техн. наук;
Н. А. Соснин, д-р техн. наук, проф.

(Санкт-Петербургский государственный политехнический университет)

Финишное плазменное упрочнение инструмента для труднообрабатываемых материалов

В отраслях тяжелого машиностроения актуальна задача повышения износостойкости и работоспособности инструмента для труднообрабатываемых материалов, таких как высокопрочные стали и чугуны, жаропрочные стали и сплавы и другие материалы.

Технология финишного плазменного упрочнения (ФПУ) путем нанесения износостойкого нанопокрyтия на основе соединений кремния (рис. 1, 2) дает возможность решить эту задачу с минимальными капитальными и эксплуатационными затратами без применения вакуумных систем [1, 2].

Данная технология отличается малым энергопотреблением, мобильностью и экологической чистотой. В результате на обрабатываемой поверхности формируется тонкий слой упрочняющего покрытия толщиной порядка 0,5...2 мкм, который не только сохраняет исходную шероховатость поверхности, но и зачищает микродефекты, и создает под покрытием в металле сжимающие остаточные напряжения, благотворно сказывающиеся на работоспособности инструмента в самых высоконагруженных режимах.

Покрyтие, включающее карбид, оксид и нитрид кремния, ха-

рактеризуется высокой микротвердостью — до 52 ГПа (при нагрузке на индентор до 9,8 мН (0,5 гс), жаростойкостью до 1000...1100 °С. Достаточно высокое удельное электросопротивление покрытия ($\rho = 10^6$ Ом·м), обеспечивая необходимые диэлектрические свойства, исключает электроконтактное схватывание трущихся поверхностей, повышая износостойкость инструмента.

Подаваемые в дуговой плазмотрон пары специальных жидких реагентов в результате плазмохимических реакций обеспечивают формирование непосредственно на упрочняемой поверхности



Рис. 1. Финишное плазменное упрочнение металлорежущего инструмента

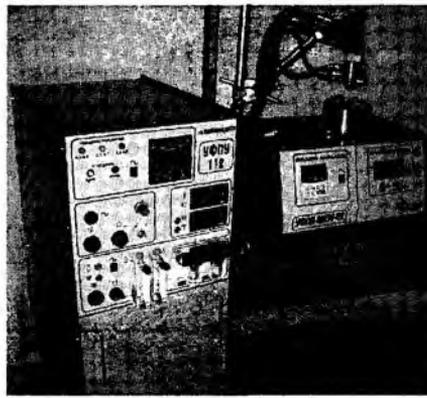


Рис. 2. Комплекс оборудования для финишного плазменного упрочнения инструмента

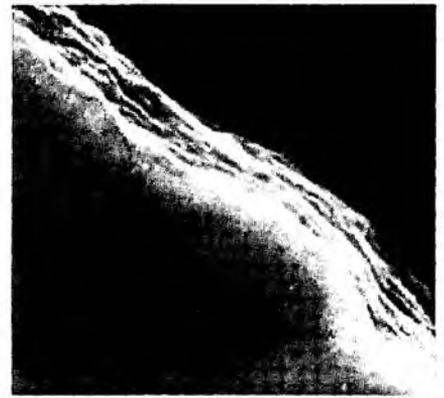


Рис. 3. Поперечный шлиф поверхности с нанесенным упрочняющим покрытием. $\times 5000$

слоя нанопокрyтия толщиной от 2 нм в каждом цикле. Циклическое нанесение покрытия при взаимном перемещении плазменной струи и упрочняемой поверхности определяет слоистую структуру покрытия (рис. 3) и позволяет до минимума уменьшить термическое воздействие плазмы на упрочняемую поверхность, полностью исключая разупрочняющий отпуск для всех сталей. Нагрев упрочняемого инструмента не превышает 100...150 °С.

Исключение недопустимого перегрева обрабатываемого изделия, которое может привести к отпуску закаленного металла и к потере им эксплуатационной стойкости, является обязательным условием для упрочнения режущего инструмента с острыми кромками. Решение этой задачи наиболее актуально для цилиндрических и конусных поверхностей инструмента, особенно — для конусов с острой вершиной диаметром d , близким или равным нулю (рис. 4). Целесообразно рассмотреть универсальный метод циклического нанесения упрочняющего нанопокрyтия на цилиндрические и конусные поверхности инструмента (сверла, развертки, фрезы и др.).

Исключение вероятности перегрева инструмента обеспечивается следующими действиями:

- с учетом того, что расчетная ширина полосы упрочнения равна 8 мм, начальное положение плазмотрона $C_{нач}$ устанавливает-

ся за пределами конусной поверхности на расстоянии 12 мм от вершины конуса, а конечное положение плазмотрона $C_{кон}$ расчетными параметрами колебателя плазмотрона обеспечивается за пределами реального конуса; такая технология полностью исключает вероятность перегрева изделия в моменты реверса колебателя, что особенно важно при наличии в конусной поверхности острых кромок, например, в конических фрезах и в другом режущем инструменте;

- скорость вращения инструмента рассчитывается с учетом того, что окружная скорость на любом диаметре конуса не должна превышать максимально допустимую — 150 мм/с, что обусловлено газодинамическими процессами взаимодействия обрабатываемой поверхности и плазменной струи.

Толщина F , мкм, наносимого при ФПУ покрытия определяется как

$$F = \frac{tK_{п}}{S_{р}}, \quad (1)$$

где t — время нанесения покрытия, с; $K_{п}$ — коэффициент производительности, определяемый по опытным данным, мкм · мм²/с; $S_{р}$ — расчетная площадь, на которую наносится покрытие.

Как показали исследования, при нанесении покрытия параллельными полосами коэффици-

ент производительности $K_{п}$ зависит от шага b полос покрытия:

$$K_{п} = 2,2062 + 0,301b - 0,0222b^2. \quad (2)$$

Конусную поверхность можно условно разбить на кольцевые участки, каждый из которых обрабатывается за два оборота конуса, тогда время t нанесения покрытия на каждом участке будет $2t_{об}$, где $t_{об}$ — время одного оборота конуса при нанесении покрытия на данный кольцевой участок.

Расчетная площадь $S_{р}$ каждого кольцевого участка зависит от диаметра участка d_x и его ширины, определяемой шагом b полос покрытия (при движении по винтовой линии b — это шаг винтовой линии).

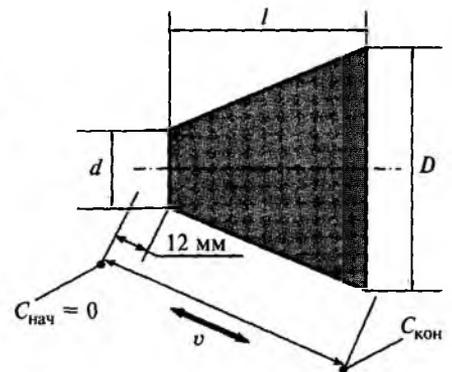


Рис. 4. Схема движения плазмотрона при ФПУ конусных поверхностей (v — скорость колебаний вдоль образующей конуса)

Таким образом, расчетная площадь S_p каждого кольцевого участка равна

$$S_p = \pi d_x(8 + b), \quad (3)$$

где d_x — средний диаметр данного кольцевого участка на конусной поверхности.

При колебательном движении плазмотрона вдоль образующей конуса (по оси x) каждый из условно выделенных кольцевых участков испытывает воздействие плазменной струи два раза за один цикл колебаний («туда» плюс «обратно»). Таким образом, за все время обработки конуса толщина покрытия $F_{сум}$ на данном участке будет

$$F_{сум} = F \cdot 2N_{ц}, \quad (4)$$

где $N_{ц}$ — число циклов колебаний плазмотрона за время обработки конуса.

Длина «виртуальной» конусной поверхности L с добавкой в начале реального конуса, равной 16 мм (начальное смещение 12 мм плюс половина расчетной ширины полосы нанесения покрытия, то есть 4 мм) (рис. 4 и 5) равна

$$L = \sqrt{(0,5D - 0,5d)^2 + l^2} + 16, \quad (5)$$

где l — длина конуса; D — выходной диаметр конуса.

Целое число локальных участков M (шагов винтовой линии) принимается с запасом с тем, чтобы плазмотрон располагался за основанием реального конуса (смещение плазмотрона — не менее одного, но меньше двух «виртуальных» участков в зависимости от длины конуса l):

$$M = \text{Int}\left(\frac{L}{8}\right) + 2, \quad (6)$$

где $\text{Int}()$ — функция, возвращающая ближайшее меньшее целое число локальных участков.

Расчетная длина образующей «виртуального» конуса (с учетом диаметра основания «виртуального» конуса D_k на внешней границе последнего участка (см. рис. 5):

$$L_p = 8M. \quad (7)$$

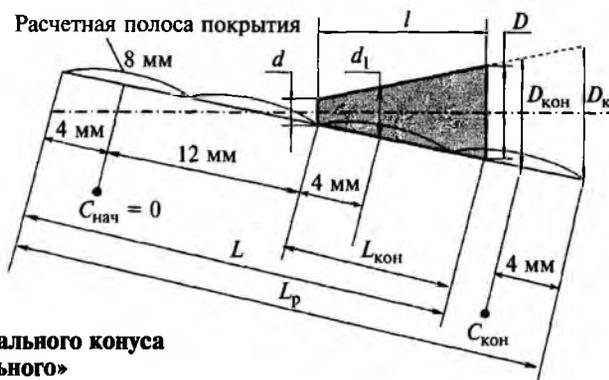


Рис. 5. Соотношение реального конуса и образующей «виртуального»

Конечное смещение плазмотрона $C_{кон}$

$$C_{кон} = L_p - 2 \cdot 4. \quad (8)$$

Диаметр основания «виртуального» конуса D_k , соответствующий внешней границе последнего участка, равен

$$D_k = d + \frac{(D - d)(L_p - 16)}{\sqrt{(0,5D - 0,5d)^2 + l^2}}. \quad (9)$$

Диаметр «виртуального» конуса $D_{кон}$, соответствующий конечному смещению плазмотрона $C_{кон}$, равен

$$D_{кон} = D_k - \frac{4(D - d)}{\sqrt{(0,5D - 0,5d)^2 + l^2}}. \quad (10)$$

Условный диаметр d_1 на траектории первого участка на реальном конусе (смещенный на 4 мм от вершины реального конуса) определяется как

$$d_1 = d + \frac{4(D - d)}{\sqrt{(0,5D - 0,5d)^2 + l^2}}. \quad (11)$$

Расчетная площадь S_p обрабатываемой «виртуальной» конусной поверхности (с учетом смещения плазмотрона за пределы реального конуса) с минимальной погрешностью может быть определена как

$$S_p \approx \pi 0,5(d + D_k)L_p. \quad (12)$$

Общее время обработки $t_{общ}$ рассчитывается в первой итерации с учетом эмпирических данных:

$$t_{общ} = \frac{S_p F}{3,2}. \quad (13)$$

Возможны четыре варианта обработки конусной поверхности, представленные в табл. 1:

Вариант 1 — самый простой в реализации, но для конусной поверхности движение плазменной струи по винтовой траектории на конусе при меняющемся среднем текущем диаметре d_x ведет к изменению расчетной площади S_p , шага b , коэффициента производительности K_p и, в итоге — к существенной неравномерности толщины покрытия (см. (1)).

Вариант 2 позволяет за счет переменной скорости колебаний плазмотрона несколько скомпенсировать рост текущего диаметра d_x уменьшением шага b (см. (3)).

Рассмотрим для примера алгоритм расчета варианта 2.

Начальная расчетная скорость v_1 колебательного движения плазмотрона вдоль образующей реального конуса на диаметре d_1 назначается при максимальном шаге винтовой линии на конусной поверхности — 8 мм (с учетом того, что расчетная ширина полосы нанесения упрочняющего покрытия равна 8 мм).

Изменение скорости колебательного движения плазмотрона от начальной (большой) $v_{нач}$ до

Таблица 1
Варианты нанесения нанопокрyтия на конусную поверхность

№ варианта ФПУ	Скорость вращения конуса (время одного оборота, $t_{об}$)	Скорость колебания плазмотрона, v
1	Const	Const
2	Const	Var
3	Var	Var
4	Var	Const

конечной (малой) $v_{\text{кон}}$ и обратно принимается линейным, что может обеспечиваться механизмом колебаний плазмотрона.

Начальная скорость v_1 при условии, что окружная скорость на большом диаметре D конуса принимается максимально допустимой (150 мм/с), равна:

$$v_1 = \frac{8}{t_{106}}, \quad (14)$$

где t_{106} , с — время одного оборота конуса, определяемое как

$$t_{106} = \frac{\pi D}{150}. \quad (15)$$

Чтобы получить покрытие на всей конусной поверхности более равномерной толщины необходимо скомпенсировать уменьшение времени воздействия плазмы на единицу обрабатываемой площади по мере смещения плазмотрона на участки конуса, имеющие большие диаметры. Этого можно достичь, уменьшая шаг винтовой линии в соответствии с ростом диаметра конуса, для чего необходимо снижать скорость движения плазмотрона до минимального значения скорости $v_{\text{кон}}$, соответствующей конечному смещению $C_{\text{кон}}$:

$$v_{\text{кон}} = v_1 \frac{d_1}{D_{\text{кон}}}. \quad (16)$$

В положении начального смещения плазмотрона $C_{\text{нач}}$ начальная скорость движения плазмотрона $v_{\text{нач}}$ задается с учетом ее дальнейшего линейного уменьшения до минимального конечного значения $v_{\text{кон}}$:

$$v_{\text{нач}} = v_1 + 16 \frac{(v_1 - v_{\text{кон}})}{(C_{\text{кон}} - 16)}. \quad (17)$$

Для линейного уменьшения скорости колебательного движения плазмотрона от начального $v_{\text{нач}}$ до конечного значения скорости $v_{\text{кон}}$ время t прохождения плазмотрона вдоль всей «виртуальной» конусной поверхности

от $C_{\text{нач}}$ до $C_{\text{кон}}$ определяется интегралом

$$t = \sum_{C_{\text{нач}}}^{C_{\text{кон}}} \frac{1}{v_{\text{нач}} \frac{(v_{\text{нач}} - v_{\text{кон}}) \cdot x}{(C_{\text{кон}} - C_{\text{нач}})}} dx. \quad (18)$$

С учетом, что $C_{\text{нач}} = 0$, находим время одного цикла колебаний плазмотрона («туда» плюс «обратно») $t_{\text{ц}}$:

$$t_{\text{ц}} = 2 \frac{C_{\text{кон}}}{v_{\text{кон}} - v_{\text{нач}}} [\ln(v_{\text{кон}}) - \ln(v_{\text{нач}})]. \quad (19)$$

Целое число циклов колебаний плазмотрона равно

$$N_{\text{ц}} = \text{Int} \left(\frac{t_{\text{об}}}{t_{\text{ц}}} \right) + 1. \quad (20)$$

Тогда общее время обработки:

$$t_{\text{общ}} = t_{\text{ц}} N_{\text{ц}}. \quad (21)$$

Начиная со второго шага винтовой линии на поверхности реального конуса и до основания конуса D (см. рис. 5), шаги винтовой линии меньше 8 мм и полосы покрытия при движении колебателя «туда» или «обратно» (до очередного реверса) перекрывают друг друга больше, чем при шаге 8 мм. Кроме того, при колебаниях плазмотрона (с учетом реверса) траектория его движения чередует «правую» и «левую» винтовые линии на обрабатываемой поверхности, то есть полосы покрытия не накладываются друг на друга, а пересекаются на поверхности под углом. Все это должно способствовать равномерности толщины наносимого покрытия.

Результаты расчета распределения толщины покрытия на конусных поверхностях, обработанных по различным вариантам ФПУ показывают, что во всех случаях заданная толщина покрытия составляла $F_{\text{задан}} = 0,5$ мкм. Для более четкого выявления закономерностей распределения толщины покрытия на конусной поверхности прежде всего берется неусеченный конус с большим диаметром основания (рис. 6).

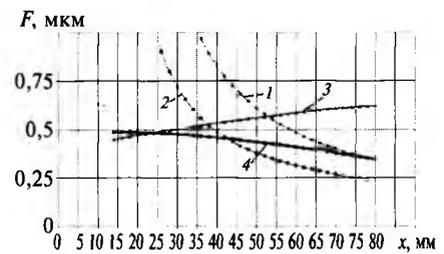


Рис. 6. Распределение толщины покрытия вдоль образующей конуса (x) при различных вариантах обработки (табл. 1) на конусе:

$d = 0$; $D = 60$ мм; $l = 60$ мм; —◆— 1; —■— 2; —▲— 3; —●— 4 — суммарная толщина покрытия за все время обработки по вариантам 1, 2, 3, 4 соответственно

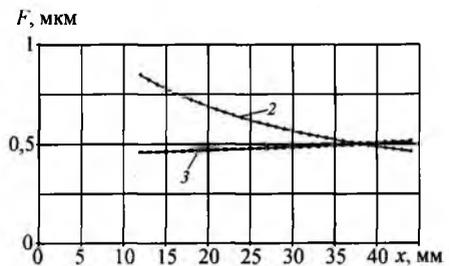


Рис. 7. Распределение толщины покрытия вдоль образующей (x) при различных вариантах обработки (табл. 1) на конусе:

$d = 10$; $D = 20$ мм; $l = 30$ мм; —◆— 2; —■— 3 — суммарная толщина покрытия за все время обработки по вариантам 2 и 3 соответственно

Как видно на рис. 6, вариант 1 обработки дает очень большую неравномерность толщины покрытия на конусной поверхности (цифрами обозначен вариант ФПУ по табл. 1).

Вариант 2 дает более приемлемые результаты, особенно, учитывая, что толщина покрытия большая заданной (0,5 мкм) получается у вершины конуса, как правило, испытывающей повышенные эксплуатационные нагрузки. При обработке усеченных конусов ($d \neq 0$) вариант 2 может быть достаточно эффективным (рис. 7). В этом случае увеличение толщины покрытия у вершины усеченного конуса обычно не превышает двукратной заданной толщины. При использовании

Упрочненный инструмент	Материал инструмента	Обрабатываемый инструментом материал	Повышение ресурса работы, раз	Предприятие
Сверло Ø23	P6M5	Сталь 65Г	2,5	ФГУП «Уралвагонзавод», Нижний Тагил
Сверло ступенчатое Ø13/24	P6M5	Сталь 20	6,6	ЗАО «Омутнинский металлургический завод»
Метчик M16	P6M5	Сталь 35Л	10,0	ФГУП «Усть-Катавский вагоностроительный завод»
Твердосплавные пластины	BK8	Сталь 25Л	10,0	ОАО «Знамя труда», Санкт-Петербург
Фреза концевая Ø10	тв.сплав ДК460UF	12X13	2,0	ОАО «Калужский турбинный завод»
Фреза концевая Ø20	P6M5	Сталь 30ХГСА	2,5	ОАО «ПО «Стрела», Оренбург
Фреза фасонная	P6M5	Сталь АС-14	3,0	ОАО «Димитровградский автоагрегатный завод»

варианта 2 нагрев вершины любого конуса минимален благодаря высокой скорости движения плазмотрона в этой зоне и максимальному шагу (8 мм) винтовой траектории на поверхности конуса.

Вариант 3 (самый сложный для реализации) дает практически почти равномерную толщину покрытия по всему конусу:

$$F = F_{\text{задан}} \pm (10...20) \%$$

(см. рис. 6), но рост толщины покрытия в указанных пределах в направлении от вершины конуса к его основанию в большинстве случаев не соответствует условиям эксплуатации.

Вариант 4, как и вариант 3 тоже дает практически почти равномерную толщину покрытия по всему конусу:

$$F = F_{\text{задан}} - (20...30) \%$$

(см. рис. 6), причем толщина покрытия у вершины конуса равна заданной $F_{\text{задан}}$, а к основанию

конуса она снижается в указанных пределах, что, как правило, соответствует условиям эксплуатации. Недостатком варианта 4 является определенная опасность перегрева вершины конуса вследствие минимального шага ($n = 0,1$ мм) винтовой траектории на поверхности конуса в этой зоне. Следует отметить, что вариант 4 требует оборудования с переменной скоростью вращения, согласованной с циклами колебаний плазмотрона. При этом программироваться должно время одного оборота $t_{1об}$ прямо пропорциональное текущему (обрабатываемому) диаметру конуса d_x , что дает возможность обрабатывать конусы с криволинейной образующей.

За каждый цикл колебаний плазмотрона на упрочняемую поверхность наносится слой покрытия толщиной 10...15 нм.

В табл. 2 приведены некоторые результаты производственных испытаний инструмента, упрочненного по технологии ФПУ.

1. Метод ФПУ с колебателем плазмотрона, выводящим плазменную струю за пределы обрабатываемой поверхности, имеет следующие основные особенности:

- недостаток — несколько снижается производительность ФПУ инструмента;
- преимущество — значительно снижается вероятность перегрева острых кромок на обрабатываемой поверхности, что делает метод ФПУ предпочтительным для нанесения износостойкого нанопокрyтия на режущий инструмент.

2. Рассмотренные метод и модель расчета являются универсальными. Их можно использовать как для конического, так и для цилиндрического инструмента, задавая одинаковое значение диаметров d и D .

3. Среди рассмотренных вариантов обработки конусных поверхностей можно выбрать приемлемый с учетом возможностей имеющегося оборудования:

вариант 2, если есть программируемый колебатель плазмотрона;

вариант 3 или 4, если есть и программируемый вращатель конуса.

Список литературы

1. Соснин Н. А., Ермаков С. А., Тополянский П. А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. — СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2008. — 406 с.
2. Тополянский П. А., Ермаков С. А., Соснин Н. А. Нанесение алмазоподобного нанопокрyтия на инструмент из быстрорежущей стали // Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня. Матер. 11-й Международной науч.-практич. конф. 14—17 апр. 2009 г. — Санкт-Петербург: Изд. СПбГПУ, 2009. Ч. 2. — С. 227—236.