

А. В. Алифанов, д-р техн. наук, ФТИ НАН Беларуси;
 В. Н. Алехнович, канд. техн. наук, ФТИ НАН Беларуси;
 А. А. Лях, науч. сотрудник ФТИ НАН Беларуси; И. Л. Баршай, профессор, БНТУ;
 Н. В. Бурносков, доцент; С. П. Гончаров, инженер-технолог, РУП «МТЗ»

ПОВЕРХНОСТНАЯ ИГЛОДЕФОРМИРУЮЩАЯ ОБРАБОТКА СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

It was determined, that the thickness of the hardened layer of the steel models after well-milling is averaging between 20 and 60 mcm, depending on the quality of steel and conditions of the process. The hardness of the processed features of the models increase in 2,2–2,9 times.

Введение. Методы обработки проволочным инструментом можно различить по следующим признакам:

характеру физических процессов, протекающих в зоне контакта «инструмент–заготовка»: без удаления стружки – поверхностная иглодеформирующая обработка, с удалением стружки – иглолезвийная обработка (крацевание, обработка режущими щетками, иглофрезерование);

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.

На рис. 1 показан общий вид инструмента для иглофрезерования – цилиндрической щетки, собранной из металлических проволочек.

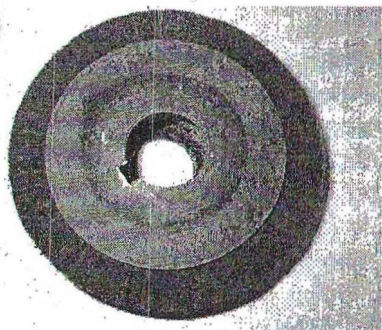


Рис. 1. Инструмент для иглофрезерования

Поверхностная иглодеформирующая обработка может быть упрочняющей, отделочно-упрочняющей и упрочняюще-зачистной. Уп-

рочняющая обработка осуществляется щетками с ударными элементами и щетками со специальными отражателями проволочного ворса. Одним из важнейших условий упрочняющей обработки является использование секционных щеток. К шероховатости поверхности после упрочняющей обработки щетками обычно предъявляются невысокие требования. Отделочно-упрочняющая обработка осуществляется сплошными щетками с нежестким ворсом длиной 50–100 мм и диаметром проволоки 0,3–0,4 мм. Шероховатость поверхности после обработки может достигать $R_a = 0,08–0,11$ мкм.

Крацевание – процесс, характеризуемый субмикрорезанием в зоне контакта проволочного ворса с заготовкой. Максимальная величина слоя, удаляемого при обработке, не превышает 0,02 мм. Ворс щеток изготавливают из стальной, латунной или нейзильбертовой проволоки диаметром 0,05–0,2 мм. Шероховатость поверхности после обработки обычно не ниже $R_a = 0,32$ мкм. Крацевание относится к отделочно-зачистной обработке. Обработка режущими щетками – процесс с преобладающим микрорезанием в зоне контакта «инструмент – заготовка». Максимальная величина слоя, удаляемого при обработке, обычно не превышает 0,3–0,5 мм, а плотность набивки ворса на режущей поверхности щетки – 50–70%.

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 $R_a = 100–0,32$ 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 – 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;
 конструкции – бескорпусные и корпусные;

форме боковых поверхностей, образованных иглами, – с коническими и цилиндрическими боковыми поверхностями;

форме режущей поверхности – цилиндрические, ступенчатые, торцовые, гиперболические.

Анализ источников. Требования к качеству деталей оказывают влияние на выбор схемы установки иглофрезы и режима иглофрезерования. При необходимости достижения шероховатости поверхности $R_a = 0,32\text{--}2,0$ мкм (отделочно-зачистная обработка) рекомендуется упругая схема установки иглофрезы с поджатием инструмента к обрабатываемой поверхности под действием пружины или груза и применение смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). Зачистная обработка характеризуется жесткой установкой иглофрезы и формированием шероховатости в пределах $R_a = 2,0\text{--}100$ мкм. Применение СОЖ в этом случае необязательно и определяется температурой в зоне контакта иглофрезы – заготовка.

На шероховатость поверхности детали оказывают влияние параметры режима иглофрезерования, что в случае отделочно-зачистной обработки является технологическим ограничением их назначения. Схема установки иглофрезы влияет на величину параметров режима обработки. Так, при обработке углеродистых сталей оптимальная скорость резания в случае использования жесткой установки инструмента составляет 2 м/с, а в случае упругой установки – 2,5 м/с.

Производительность обработки при зачистной операции определяется количеством металла, удаляемого в единицу времени (K , г/мин), а при отделочно-зачистной обработке – величиной продольной подачи, обеспечивающей сплошность обработки и необходимое количество поверхности ($S_{пр}$, м/мин). При обработке углеродистых и малолегированных сталей величина K на 10 мм режущей поверхности иглофрезы составляет 25–90 г/мин, а $S_{пр}$ – 1–3 м/мин.

В зависимости от вида обрабатываемой поверхности различаются круглое и плоское иглофрезерование, а также иглофрезерование отдельных участков детали. При круглом иглофрезеровании выполняются четыре движения формообразования: главное движение резания иглофрезы; движение круговой подачи детали (иглофрезы); движение продольной подачи детали (иглофрезы); движение 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 производится путем выполнения трех движений: главного движения резания иглофрезы, движений продольной и поперечной подач. Иглофрезерование отдельных участков деталей (например, фасок и т. п.) неза-

висимо от вида поверхности деталей, на которых находятся обрабатываемые участки, производится при выполнении тех же движений, что и при плоском иглофрезеровании.

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

При преобладании выглаживающей составляющей воздействия (отделочно-упрочняющая обработка) наблюдается уменьшение шероховатости поверхности. У предварительно шлифованных поверхностей минимальная шероховатость наблюдается при обработке щетками со сплошным ворсом с длиной проволочек 50–75 мм; у поверхностей, подвергнутых суперфинишированию, – при длине проволочек 100 мм [1]. 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.

Обработка секционными щетками деталей, предварительно шлифованных ($R_a = 1,0\text{--}1,25$ мкм) из стали 14ХНЗМА (HRC 56–60), показала, что происходит снижение параметра шероховатости R_a в 1,31–1,36 раза и увеличение микротвердости поверхности в 1,13–1,19 раза.

На изменение параметров качества оказывает влияние технологическая наследственность. Так, для стали 14ХНЗМА шероховатость поверхности уменьшается при исходной $R_a = 0,6\text{--}0,8$ мкм в 1,39 раза, при 0,51–0,61 мкм – в 1,36 раза, при 0,28–0,32 мкм – в 1,23 раза; для стали ШХ15 (HRC 62–64) – при $R_a = 0,28\text{--}0,32$ мкм – в 1,2 раза, при $R_a = 0,08\text{--}0,11$ мкм – в 1,15 раза.

Оптимальными параметрами режима обработки, обеспечивающими минимальную шероховатость, являются скорость вращения щетки 25–38 м/с, натяг 3–4 мм, время обработки 20 с, диаметр ворса 0,4 мм [2].

Обработку титановых сплавов рекомендуется проводить со скоростью вращения щетки 19 м/с при натяге 0,5–1,0 мм; время обработки 30–60 с, диаметр ворса 0,2 мм [2].

Методика исследований. Для повышения энергии удара проволочных элементов с упрочняемой поверхностью предложены щетки 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. Щетки с отражателем можно использовать и для

обработки профильной поверхности (например, дорожки качения внутреннего кольца подшипника) без трудно осуществляемого профилирования рабочей поверхности щетки. Это достигается за счет использования отражателя с направляющим желобом, обеспечивающим в момент удара проволочек с обрабатываемой поверхностью необходимую форму рабочей поверхности щетки.

Для увеличения степени упрочнения, а также для выполнения упрочняюще-зачистной обработки применяются вращающиеся механические щетки с ударными элементами [3]. Последние имеют различную форму и могут быть по-разному 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 щетки; 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 – 0,5–0,6 мм. При обработке щетками 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, – 0,1–0,15 мм.

Для определения влияния режимов иглофрезерования на формирование упрочненного слоя в обрабатываемой детали была разработана методика эксперимента и проведена обработка деталей из сталей марок 20ХН3А, 25ХГМ, 20ХНР и 25ХГТ. Обработка проводилась на семи режимах для каждой марки стали, параметры режимов приведены в таблице.

Таблица

Режимы обработки сталей
иглофрезерованием

Режимы	1	2	3	4	5	6	7
Скорость резания, м/мин	0,5	0,25	0,75	0,875	0,375	0,625	0,125
Подача, мм/об	0,5	0,75	0,25	0,625	0,125	0,375	0,875
Натяг, мм	0,5	0,25	0,75	0,125	0,625	0,375	0,875
Диаметр фрезы 150 мм							

Из обработанных деталей были вырезаны прямоугольные образцы размером 47,6×23×19,7 мм (рис. 2).

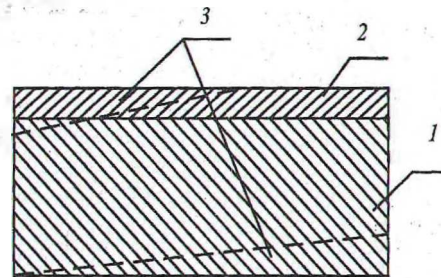


Рис. 2. Исходный образец:
1 – основной металл; 2 – упрочненный поверхностный слой (наклеп);
3 – места съема металла

Исследуемым образцам присвоены номера в соответствии с семью режимами для различных марок стали: 20ХН3А № 1–7, 25ХГМ № 11–17, 20ХНР № 21–27, 25ХГТ № 31–37.

После иглофрезерования была проведена механическая обработка шлифованием каждого образца для получения косоугольного 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 съем металла. В результате шлифовки были получены косые шлифы. Внешний вид (а) и эскиз (б) подготовленного к исследованию образца представлены на рис. 3.

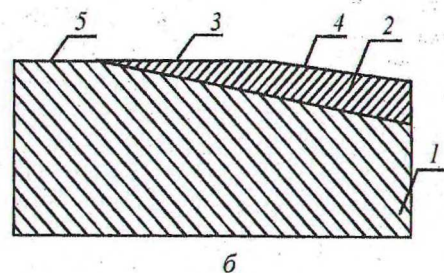
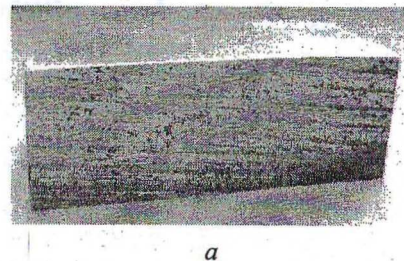


Рис. 3. Образец после шлифовки:
а – общий вид образца; б – вид образца в разрезе:
1 – основной металл; 2 – упрочненный слой;
3 – косой шлиф упрочненного слоя с переменными значениями величины наклепа; 4 – наружная поверхность упрочненного слоя с постоянным (максимальным) значением величины наклепа;
5 – измерительная поверхность для определения микротвердости основного металла

Затем была осуществлена доводка шлифов и проведены измерения микротвердости поверхности и приповерхностных слоев на разной глубине их залегания. Измерения проводились на приборе ПМТ-3 при нагрузке 100 г через равные промежутки на поверхности косого шлифа, а затем эти размеры пересчитывались в расстояние от поверхности. Расстояние на горизонтальной поверхности 500 мкм соответствовало 20 мкм глубины. Измерения микротвердости проводились следующим образом: определяли диагональ отпечатка алмазной пирамиды, причем делали не менее трех измерений, если значения были близки, при их отличии, делали до 10 измерений в точке. Затем рассчитывали среднее арифметическое и определяли диагональ в микрометрах. По этим значениям рассчитывали значение твердости.

Результаты исследований. После обработки результатов измерений микротвердости упрочненного поверхностного слоя, полученного при обработке иглофрезерованием, были построены графики зависимости микротвердости поверхностного слоя от расстояния от поверхности, что позволило получить распределение микротвердости по глубине упрочненного поверхностного слоя. На рис. 4–7 изображены зависимости изменения микротвердости в глубь образца, начиная с поверхности, от глубины залегания слоя с одинаковой твердостью для образцов из сталей марок 20ХН3А, 25ХГМ, 20ХНР и 25ХГТ. Причем микротвердость на глубине 0 обозначает твердость поверхности 4 (рис. 3, б), микротвердость на глубине упрочненного слоя 20 (поверхность 3 на рис. 3, б) обозначает твердость на глубине 20 мкм и так далее. Номера кривых обозначают номера образцов и соответствуют определенной марке стали и режиму ее обработки, приведенным в таблице.

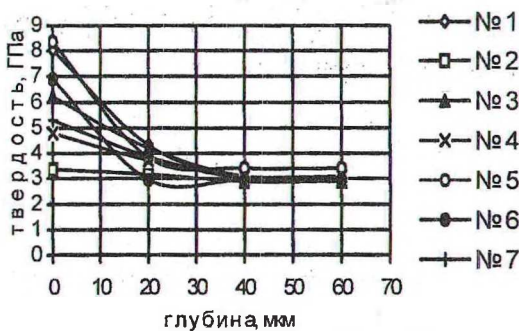


Рис. 4. Зависимость микротвердости упрочненного слоя от глубины его залегания и режимов обработки иглофрезерованием для образцов из стали 20ХН3А

На рис. 4 показаны графики распределения микротвердости по глубине упрочненного слоя образцов из стали 20ХН3А для семи режимов обработки поверхности. Из рисунка видно, что наибольшая твердость поверхности достигается

при обработке по режимам 1 и 5 (таблица), причем микротвердость интенсивно уменьшается до глубины 20 мкм, а затем постепенно уменьшается до значений микротвердости неупрочненных слоев образца из стали 20ХР3А. При обработке по режимам 3 и 7 микротвердость поверхности увеличивается более чем в два раза, но уменьшение твердости на глубине 40 мкм не такое резкое, как в предыдущем случае. Обработка по режиму 2, как показано на графике, практически не приводит к упрочнению поверхности. Режим 6, если судить по наклону кривой, дает тонкий слой с твердостью поверхности, в два раза превышающей твердость исходного металла. Режим 4 показывает меньшую твердость на поверхности, но более равномерный по толщине слой.

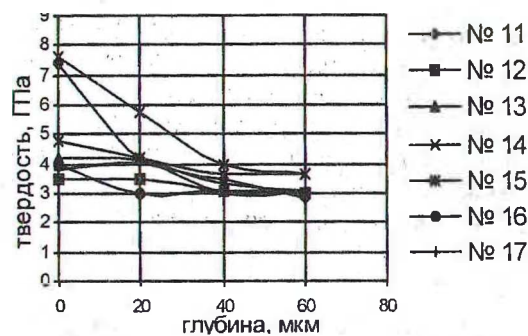


Рис. 5. Зависимость микротвердости упрочненного слоя от глубины его залегания и режимов обработки иглофрезерованием для образцов из стали 25ХГМ

На рис. 5 показаны графики распределения микротвердости по глубине упрочненного слоя образцов стали 25ХГМ также для семи режимов обработки поверхности (таблица). Из рисунка следует, что наибольшая твердость на поверхности, как и в предыдущем случае, достигается при обработке по режимам 1 и 5, причем режим 5 демонстрирует большую твердость на поверхности и большую глубину обработки, чем режим 1. При обработке по режимам 3, 7 и 6 степень упрочнения поверхности незначительна. Обработка в режиме 2, как показано на графике, практически не влияет на свойства поверхности, так же как и в первом случае (рис. 4). При режиме 4 показатели упрочнения соответствуют приведенным на рис. 4.

На рис. 6 показаны соответствующие графики распределения микротвердости для образцов стали 20ХНР.

Из рисунка следует, что наибольшая твердость поверхности достигается при обработке по режиму 1, причем твердость резко уменьшается по глубине и на 40 мкм достигает твердости основы. Режим 5 показывает меньшую твердость, но она более стабильна и равномерна по толщине упрочненного слоя, причем толщина слоя наклепа доходит до 60 мкм, что является наивысшим результатом обработки.

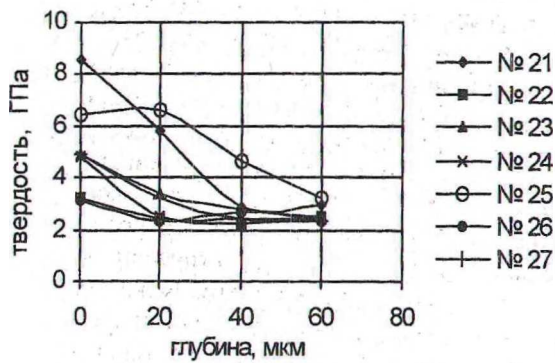


Рис. 6. Зависимость микротвердости упрочненного слоя от глубины его залегания и режимов обработки иглофрезерованием для образцов из стали 20ХНР

При обработке по режимам 3 и 7 эффект воздействия на поверхность получается абсолютно одинаковым и менее выраженным, чем в предыдущих режимах. Обработка по режимам 2 и 6, как показано на рисунке, практически не влияет на свойства поверхности. При режиме 4 получается менее толстый слой наклепа, чем при режимах 3 и 7.

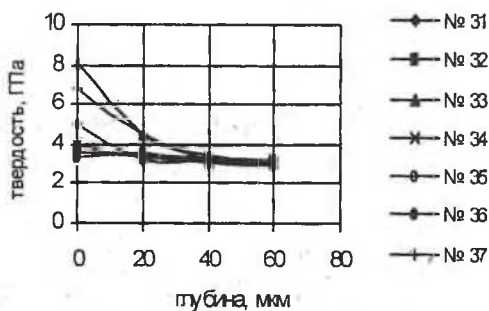


Рис. 7. Зависимость микротвердости упрочненного слоя от глубины его залегания и режимов обработки иглофрезерованием для образцов из стали 25ХГТ

На рис. 7 показаны соответствующие графики распределения микротвердости для образцов

стали 25ХГТ. Из рисунка следует, что наибольшая твердость поверхности достигается при обработке по режимам 3 и 7, причем твердость уменьшается до глубины 40 мкм, достигая исходной твердости материала.

При обработке по режиму 1 твердость поверхности около 5 ГПа и уменьшается до исходного состояния на глубине 20 мкм, что существенно меньше толщины упрочненного слоя после обработки в таком режиме для других сталей. Обработка по режимам 2, 4, 5 и 6, как показано на рисунках, практически не влияет на свойства поверхности.

Выводы. В результате проведенных исследований установлены зависимости изменения твердости упрочненного поверхностного слоя и его толщины от режима обработки и марки стали. В частности, для стали 20ХНЗА толщина упрочненного слоя достигает значений более 20 мкм, для сталей 25ХГМ и 25ХГТ — около 40 мкм, для стали 20ХНР — до 60 мкм. Микротвердость поверхности повышается в 2,2–2,9 раза по сравнению с микротвердостью самого материала в зависимости от марки стали и режимов иглофрезерования.

Литература

1. Кургузов, Ю. И. Технологическое обеспечение качества поверхности при упрочнении механическими щетками / Ю. И. Кургузов, Д. Д. Папшев // Вестн. машиностроения. — 1986. — № 4. — С. 54–58.
2. Отделочно-упрочняющая обработка сплава ВТ8 вращающимися металлическими щетками / Н. А. Дунин [и др.] // Прогрессив. Методы обработки деталей летательных аппаратов и двигателей. — Казань: КАИ, 1986. — С. 56–61.
3. Порепичка, Е. В. Очистно-упрочняющая обработка изделий щетками / Е. В. Порепичка. — М.: Машиностроение, 1989. — 136 с.