

ОПТИМИЗАЦИЯ ИНСТРУМЕНТА КРИОГЕННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Один из самых распространённых способов формообразования деталей — обработка металлов резанием и давлением. Наибольшую прибыль в сумме дают эффективная обработка, совершенное оборудование, инструмент повышенной стойкости и ресурса. Методы обработки за последние годы значительно усовершенствовались: улучшились инструментальные материалы, увеличилась мощность и скорость станков, появляются новые разработки, посвящённые процессам нанесения функциональных одно- и многослойных покрытий инструмента.

Текст: Николай Кокорин, кандидат технических наук, доцент,
директор по науке и развитию ООО «НПЦ «КриоТехРесурс»



Легированные инструментальные и быстрорежущие стали получили широкое применение при изготовлении инструмента сложной формы с большим отношением длины к диаметру. Такие стали характеризуются повышенной износостойкостью и способностью сохранять мартенситную структуру и соответственно высокую твёрдость, прочность при нагреве режущей кромки до 250 и 600 °С соответственно.

Значительно повысить ресурс, стойкость и режущие свойства инструмента из этих

материалов можно технологическими способами за счёт дополнительных операций: обработки в атмосфере сухого и перегретого пара; нанесения PVD-покрытий; криогенной обработки.

Обработка в атмосфере сухого и перегретого пара — простая, недорогая и безопасная операция, способствующая повышению стойкости инструмента на 50–75%. В результате такой обработки на поверхности инструмента образуется окисная плёнка толщиной 2–5 мкм. Она

защищает инструмент от коррозии, удерживает смазку, снижает коэффициент трения и препятствует свариванию стружки с инструментом при резании. Кроме того, обработка паром устраняет недоотпуск, полученный при комплексной термообработке, и снимает шлифовочные напряжения в инструменте.

В производстве режущего инструмента из инструментальных сталей PVD-покрытия являются средством дополнительного повышения

износостойкости за счёт высокой твёрдости, низкого коэффициента трения, высокой химической устойчивости, повышения теплопроводности. Стойкость инструмента с PVD-покрытием повышается в 1,5–2 раза.

Одной из перспективных технологий преобразования остаточного аустенита в мартенсит и стабилизации поверхностной твёрдости является криогенная обработка (КО) стали. Она предусматривает охлаждение до температуры жидкого азота стали, прошедшей закалку, и однократный или многократный отпуск, выдержку при этой температуре, нагрев и последующий низкий отпуск. По такой схеме криогенная обработка используется как дополнительная упрочняющая обработка. В результате криогенного упрочнения повышается износостойкость за счёт высокой и стабильной твёрдости, низкого коэффициента трения, повышения теплопроводности. Стойкость инструмента из инструментальной стали с криогенным упрочнением повышается в 1,2–2 раза.

ОБРАБОТКА ХОЛОДОМ

Криообработка режущего металлообрабатывающего инструмента (свёрла, фрезы, протяжки, плашки, метчики и т. п.) изменяет физико-механические свойства инструментальных материалов — твёрдость, прочность, ударную вязкость, пластичность, теплопроводность, удельную объёмную теплоёмкость и другие. Поэтому при определении режимов резания для обработки инструментом с криогенным упрочнением необходимо вносить корректировки.

Скорость резания V_p традиционно рассчитывают по эмпирическим формулам, установленным для каждого вида обработки. В общем виде скорость резания можно представить:

$$V_p = V_{тб} \cdot k_v, (1)$$

Вычисленная с использованием табличных данных скорость резания $V_{тб}$ учитывает «стандартные условия» резания (обработка стали 45, $\sigma_{ов} = 750$ МПа, без корки, режущим инструментом из стали Р6М5, удовлетворяющим требованиям ГОСТ и т. д.).

Реальные условия обработки существенно отличаются от «стандартных». Поэтому для получения значения скорости резания в реальных условиях (с использованием инструмента с криогенным упрочнением) нужно вводить поправочный коэффициент k_v , учитывающий их отличие от «стандартных» условий.

$$k_v = K_{mv} K_{pv} K_{iv}, (2)$$

где K_{mv} — коэффициент, учитывающий качество обрабатываемого материала; K_{pv} — коэффициент, учитывающий состояние поверхности обработки; K_{iv} — коэффициент, учитывающий влияние инструментального материала.

ПРОБА СВЕРЛА

Чтобы определить значение K_{iv} инструмента из Р6М5, упрочнённого криогенной обработкой, был проведён производственный эксперимент с целью найти оптимальную скорость резания при сверлении с позиции максимальной стойкости инструмента. При реализации эксперимента не допускалось поломки свёрл. Использовали механизированную подачу инструмента, равную 0,14 мм/об. Обрабатывали глухие отверстия диаметром 5,7 мм, глубиной 18 мм, с обильным охлаждением 5% раствором эмульсола. В качестве обрабатываемого материала использовали сталь 45 твёрдостью 207НВ с предварительно обработанной поверхностью (Rz40).

Для исследования использовали свёрла спиральные с цилиндрическим хвостовиком средней серии по ГОСТ 10902–77, обработанные в атмосфере перегретого пара. Выяснилось, что реальный состав стали Р6М5 существенно отличается от стандартного по содержанию углерода, вольфрама, молибдена и хрома.

Твёрдость свёрл до и после КО определила пятиступенчатая система измерения, в результате был вычислен разброс твёрдости. Так, средние значения после КО возросли на 4 HRC. КО обеспечила и снижение разброса твёрдости с 5,5 до 3,5 HRC, что по этому информативному показателю указывает на некоторое «выравнивание» механических характеристик свёрл в партии.

Криогенное упрочнение свёрл проводили в криогенной камере «КП-0,33» с автоматизированной системой управления температурно-временными параметрами процесса. Процесс КО включал медленное охлаждение до температуры кипения жидкого азота, выдержку при криогенном режиме, постепенный возврат к комнатной температуре и снятие температурных напряжений низким отпуском. Конструкция криогенной камеры обеспечивает протекание «сухого» процесса упрочнения, т. е. исключён контакт жидкого азота с обрабатываемыми деталями, что препятствует появлению микротрещин.

В ходе промышленного эксперимента проводили фиксацию стойкости свёрл по

времени. Затем на каждом уровне определяли среднее значение стойкости инструмента. В результате было установлено, что КО стабильно повышает этот показатель от 12 до 22%.

Характерно, что максимальная стойкость достигается при меньших скоростях резания, когда износ сверла по главным режущим кромкам превалирует над износом по поперечной кромке. При повышенных скоростях, напротив, развивается преимущественно по поперечной кромке инструмента и в этом случае имеет схожий характер с износом главных режущих кромок.

Дополнительно испытаны свёрла с упрочнением и без него на скорости резания 22,37 м/мин без подачи СОЖ. Результаты показали, что подача СОЖ повышает стойкость свёрл без упрочнения в 8,3 раза, а криогенно упрочнённых — в 6 раз. Увеличение стойкости свёрл с криогенным упрочнением и без него при сверлении без СОЖ сохраняется и составляет 52%.

При повышенной скорости резания без подачи СОЖ и без КО свёрла изнашиваются на максимальном радиусе сверла, вплоть до посинения главной режущей кромки. При аналогичной величине износа, но уже с криогенным воздействием, главная режущая кромка сверла приобретает цвета побежалости. Представленная качественная оценка износа свёрл, работающих в условиях без подачи СОЖ, говорит о том, что теплопроводность материала инструмента с криогенным упрочнением выше, чем быстрорежущей стали без КО.

Среднее число обработанных отверстий свёрлами с КО на 48 больше, чем без неё. Причём максимальный прирост количества отверстий наблюдается на режимах с наименьшей производительностью сверления.

Оперировать критериями стойкости инструмента и количеством обработанных отверстий инструментом до переточки не всегда удобно. При оценке повышения производительности технологической операции в качестве критерия используют продуктивность обработки.

В результате промышленного эксперимента проведено две серии опытов. Первые опыты при малых скоростях резания подтвердили наличие возрастающей ветви зависимости объёма срезанного металла от скорости резания $W = f(V)$ (рис. 1). Вторая серия доказала существование ниспадающей ветви зависимости скорости резания от стойкости инструмента $W = f(V)$.

Пересечение линий ниспадающей и возрастающей ветвей зависимости объёма срезанного металла от скорости резания $W = f(V)$ даёт оптимальное значение скорости резания по критерию максимальной производительности для инструмента с криогенным упрочнением и без него.

Максимальная эффективность сверления быстрорежущим инструментом без упрочнения составляет 293 333 мм³ на скорости резания $V_p = 19,75$ м/мин. Экстремум эффективности применения инструмента с КО равняется $W = 315 000$ мм³ при скорости резания $V_p = 20,7$ м/мин.

Показателем максимальной продуктивности (293 333 мм³) сверления быстрорежущим инструментом без упрочнения можно достичь и криогенно упрочнённым инстру-

ментом с большей производительностью на скорости резания, примерно равной $V_p = 24,3$ м/мин. В последнем случае производительность вырастет на 23%.

ЭКСПЕРИМЕНТ НОМЕР ДВА

Аналогичный эксперимент проведён по обработке отверстий метчиками М6 из стали 9ХС в диапазоне скоростей резания от 6,0 до 20,0 м/мин. Максимальную эффективность нарезания резьбы метчиком из легированной инструментальной стали без упрочнения можно обеспечить КО с большей производительностью на скорости, примерно равной $V_p = 19,6$ м/мин. В этом случае производительность выше на 33%.

Определив оптимальную скорость резания при сверлении и нарезании резьбы инструментом с КО, с учётом максимальной стой-

кости инструмента из стали без криогенного упрочнения и эквивалентной эффективности, можно обратиться к определению поправочных коэффициентов.

Значения поправочного коэффициента Кив, учитывающего влияние инструментального материала на скорость резания согласно зависимости (2), могут быть дополнены для сталей 9ХС и Р6М5 с КО значениями, равными 0,8 и 1,23 (таблица 1).

СОКРАТИТЬ ИЗНОС

Рассмотрим инструменты холодной обработки давлением: вытяжные штампы, высодочный инструмент, резьбонакатные ролики, резьбонакатные плашки. Они утрачивают работоспособность в результате малоциклового усталости и потери размерной точности из-за износа.

Для изучения влияния КО на абразивную износостойкость сталей 9ХС, Х12МФ и Р6М5 исследуемые образцы Ø 6 мм изнашивались по свежему следу на закреплённом абразиве по отработанной методике.

Массовый (весовой) износ определяли на аналитических весах ВЛ-120 с точностью 0,0001 г. Результаты испытаний на абразивный износ представлены на рис. 2.

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что относительная износостойкость термообработанного образца из стали Р6М5 выше в 1,5 раза показателей образца из стали 9ХС, а образца из стали Х12МФ в 1,67 раза выше износостойкости образца из стали 9ХС в термообработанном состоянии. Стоимость инструментальной стали определённого сортамента Р6М5 составляет 370 руб./кг, что более чем в 8 раз выше стоимости килограмма стали 9ХС и в 2,3 раза выше стоимости стали Х12МФ. Но эти стали отличаются ещё и теплостойкостью.

Рис. 1. Зависимость эффективности сверления быстрорежущим инструментом с КО (1) и без упрочнения (2) при различных скоростях резания

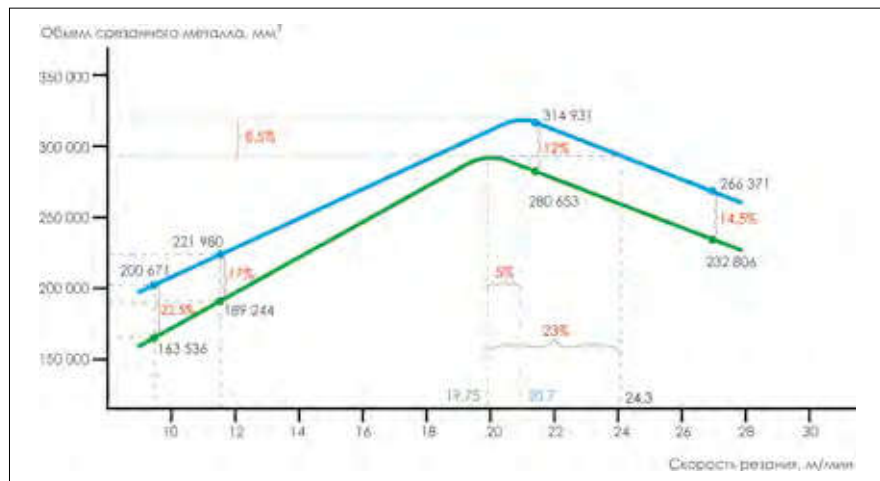
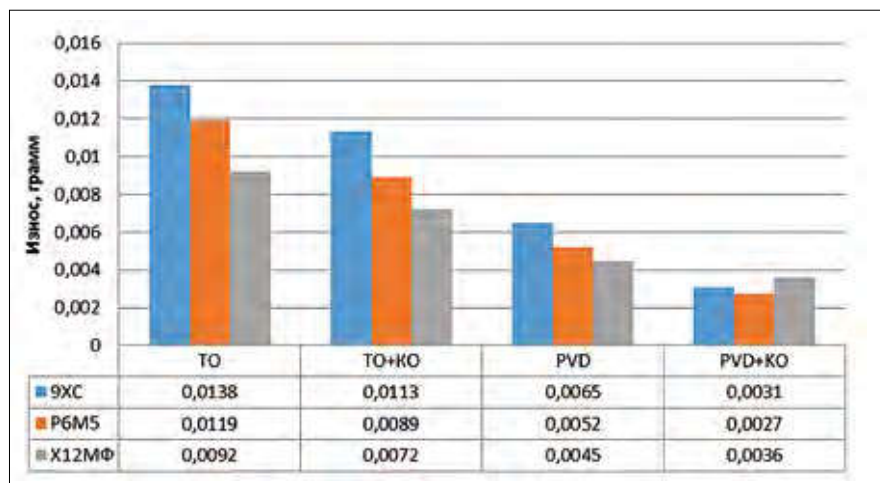


Рис. 2. Испытания на абразивный износ



ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ИСПЫТАНИЙ:

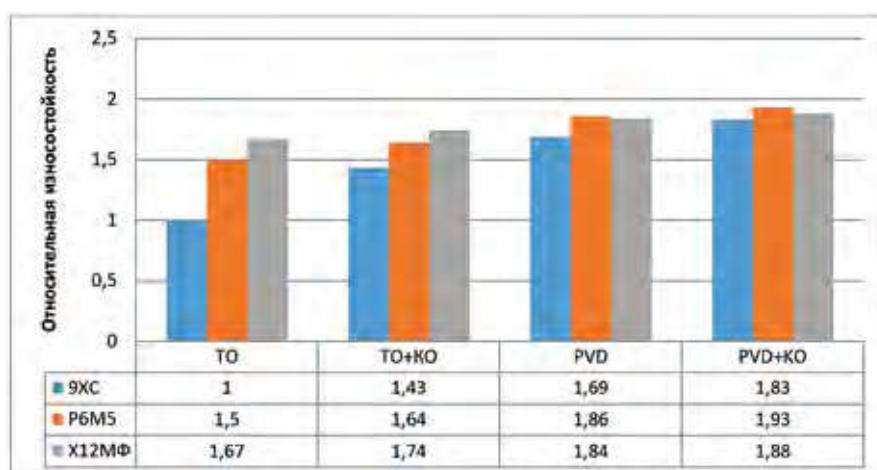
- сила нагружения образца $N = 4Н$;
- скорость перемещения $F = 500$ мм/мин;
- путь трения $L = 415$ мм;
- зернистость абразива (электрокорунда) Р240.

Таблица 1. Значения коэффициента Кив для различных инструментальных материалов.

Обрабатываемый материал	Инструментальный материал							
	Р6М5	Р6М5*	ВК4	ВК6	9ХС	9ХС*	ХВГ	У12А
Сталь, чугун, медные и алюминиевые сплавы	1,0	1,23	2,5	2,7	0,6	0,8	0,6	0,5

* материал после КО

Рис. 3. Относительная износостойкость сталей 9ХС, Р6М5, Х12МФ в результате криогенного воздействия при зернистости абразива Р240



Сравнение износа образцов из исследуемых сталей, обработанных по различным технологическим схемам при испытании в условиях крупного (Р240) абразивного зерна, позволяет сопоставить эффективность тех или иных технологических решений (рис. 3).

Если принять за единицу относительную износостойкость термически обработанных образцов из стали 9ХС, то криогенная обработка повышает износостойкость инструментального материала в 1,43–1,74 раза. Такой прирост износостойкости в результате КО позволяет инструменту из стали 9ХС конкурировать с аналогом из более дорогой стали Р6М5 без обработки холодом.

Нанесение PVD-покрытий обеспечивает повышение абразивной износостойкости исследуемых материалов в 1,69–1,86 раза

по сравнению с термической обработкой и в 1,44–1,49 раза относительно КО.

Наибольший прирост абразивной износостойкости наблюдается при использовании технологической схемы упрочнения с наибольшей добавленной стоимостью — при криогенной обработке изделий с PVD-покрытием. Показатель становится больше в 1,83–1,93 раза по сравнению с термообработанной сталью 9ХС и в 1,45–1,58 раза больше по сравнению с PVD-покрытием.

Полученные результаты исследования были подтверждены результатами эксплуатационных испытаний. В частности, в условиях производственных испытаний по определению стойкости фрезы модульной 2510–2314 ГОСТ 16771 (материал — сталь Р6М5 с PVD-покрытием) после КО установлено двукратное увеличение стойкости

фрезы. Если фрезой с PVD-покрытием обрабатывается 8 деталей, то ресурс после дополнительной криогенной обработки вырос в два раза.

Стоимость КО такой фрезы составила 500 рублей при стоимости инструмента 19 500 рублей. Стоимость обработки одной детали фрезой с PVD-покрытием составляет $19\,500 / 8 = 2\,437,5$ руб./шт. С криогенным упрочнением — $19\,500 / 16 = 1\,250,0$ руб./шт. Таким образом, на каждой изготовленной детали с использованием инновационного инструмента можно сэкономить $2\,437,5 - 1\,250,0 = 1\,187,5$ рубля.

Мониторинг ресурса упрочнённых КО твердосплавных концевых фрез с PVD-покрытием диаметром от 6 до 16 мм, используемых для обработки деталей с поверхностной твёрдостью до 50 единиц HRC, на протяжении 6 месяцев, показал увеличение стойкости от 25 до 30%. Стоимость КО таких фрез не превышает 6% от цены фрезы.

КО инструмента с покрытием незначительно повышает его стоимость. При этом стойкость повышается на 25–30% и более. Это гарантия роста производительности изготовления деталей, наиболее полного использования установленной мощности и скорости обработки современного металлообрабатывающего оборудования. Прирост стойкости в процентном выражении значительно превосходит затраты на КО, что обеспечивает оптимизацию инструмента при резании и обработке давлением.

Дальнейшее снижение затрат на изготовление деталей и получение прибыли в металлообработке невозможно без применения инструмента, оптимизированного криогенным упрочнением.