

УДК 621.941.1:621.9.025.7

РАЗВИТИЕ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ

канд. техн. наук В.Я. ЛЕБЕДЕВ
(Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск)

Рассмотрены результаты исследований механической обработки восстановленных деталей. Описана кинематика процесса ротационного точения, в том числе прерывистых поверхностей. Изложены результаты восстановления крупногабаритных шнеков.

В ряде отраслей промышленности, и особенно в тяжелом машиностроении, обеспечивающем техникой транспортное и сельскохозяйственное машиностроение, нефтегазовый комплекс, целлюлозно-бумажную и другие отрасли, актуальными являются проблемы обеспечения точности геометрической формы и качества поверхностного слоя крупногабаритных и ответственных деталей. Значительная доля таких деталей имеют прерывистые рабочие поверхности, формируемые при механической обработке, грани которых определяют работоспособность рабочих органов и оборудования в целом. При изготовлении таких деталей широкое применение находят материалы с высокими физико-механическими и другими специальными свойствами, позволяющими в полной мере реализовать потенциал скоростных и динамичных машин и механизмов по производительности и качеству, снижая в то же время их металлоемкость и вес. Применение таких материалов обусловлено как режимами работы машин и механизмов, так и условиями окружающей среды, и возросшей химической агрессивностью технологических сред.

Относительно высокая материалоемкость и стоимость таких деталей делает целесообразным восстановление их работоспособности современными технологиями:

- наплавкой материалов, близких по физико-механическим свойствам исходному материалу детали;
- нанесением износостойких порошковых покрытий с последующим их оплавлением или без него;
- наваркой на восстанавливаемые участки деталей втулок, полос и подобных им элементов.

Перечисленные и другие известные методы восстановления требуют последующей механической обработки, которая осложнена, как правило, неравномерностью припуска, высокой твердостью и прочностью обрабатываемого материала, высокими требованиями к точности формы и качеству восстановленных поверхностей. Традиционные способы обработки на таких операциях малоэффективны. Обработка резанием таких материалов также сопровождается технологическими проблемами, связанными с необходимостью снижения режимов обработки, значительным снижением стойкости режущего инструмента, увеличением динамической и тепловой нагрузки на элементы технологической системы. В совокупности это ведет к резкому снижению производительности для достижения требуемого уровня качества обработки. В технологической практике решение указанных проблем достигается несколькими путями, например:

- разработкой новых методов обработки с более эффективной кинематикой рабочих движений при резании;
- применением инструментальных материалов с оптимальным сочетанием эксплуатационных свойств (высокая твердость и достаточная прочность);
- применением технологических сред, интенсифицирующих процесс резания за счет химического воздействия и изменения условий физико-механического взаимодействия рабочих поверхностей инструмента и обрабатываемого материала;
- применением высокоэнергетических методов воздействия на обрабатываемый материал, приводящих к снижению прочности срезаемого слоя;
- оптимизацией режимов резания и геометрии инструмента, выбором оптимального инструментального материала для конкретных условий обработки, внедрением процедур сертификации инструментов.

Рассмотрим некоторые направления, исследование и разработка которых выполнены в Физико-техническом институте НАН Беларуси.

Традиционная кинематика процессов лезвийной обработки, например точения, основана на сочетании вращательного движения заготовки и продольного движения резца, установленного на заданную глубину резания. При этом величина скорости главного движения резания совпадает с относительной скоростью трения задней поверхности режущего лезвия и обрабатываемой поверхностью заготовки. Таким образом, повышение скорости резания всегда сопровождается ростом динамической и тепловой нагрузки на режущий инструмент и ведет к снижению его стойкости. Известные способы повышения стойкости инструмента основаны на снижении скорости относительного скольжения инструмента и заготовки или периодизации работы режущего лезвия в процессе резания. Например, принудительное касательное перемещение лезвия в процессе резания или поворот его вокруг оси, реализованные в инструментах для «бреющего» резания. Установка на передней поверхности резца ролика облегчает сход стружки, снижает силу резания и повышает стойкость резца. Однако указанные способы характеризуются тем, что

в резании каждая точка режущего лезвия участвует лишь один раз и для возобновления процесса резания необходимо его прерывание и возврат в исходное состояние.

В Физико-техническом институте НАН Беларуси разработаны способы ротационного резания, которые одновременно позволяют снизить скорость относительного скольжения в контактной зоне и сообщают процессу прерывистый характер резания элементарным участком лезвия, сохраняя непрерывность процесса стружкообразования и не снижая производительности. Идея круглой режущей части инструмента, совершающей вращательное движение при резании, принадлежит английскому изобретателю J. Napier [1]. Основное применение и преимущества он видел в придании различной скорости вращения режущего лезвия при обработке материалов (в основном древесины) различной твердости. До промышленного применения идея доведена лишь в 60-е годы прошлого столетия благодаря работам, выполненным, в первую очередь, в ФТИ под руководством академика Е.Г. Коновалова, а также в Харьковском авиационном институте, МВТУ им. Баумана и др.

Учитывая особенности обработки восстановленных поверхностей, возникающую при этом неравномерность вращения режущего лезвия, представляется необходимым оценить влияние конструкции шпиндельного узла на кинематические параметры процесса [2,3].

Чередование снятия стружки с холостым пробегом инструмента оказывает существенное влияние не только на состояние его режущей части, но и на работоспособность шпиндельного узла, состояние которого в значительной мере определяет качество обработки. Изменение кинематических параметров за время холостого хода обусловлено наличием потерь на трение в опорах ротационного инструмента, приводящих к изменению угловой скорости резца, а значит и кинематического коэффициента, являющегося важнейшим кинематическим параметром ротационной обработки [4]. Таким образом, во время прохождения прерывистости на инструмент действует момент инерции вращающихся элементов и момент трения в его опорах. На основании принципа Д'Аламбера - Лагранжа уравнение движения для вращающейся системы имеет вид:

$$(M_u + M_{тр})d\varphi = 0, \quad (1)$$

где M_u – момент инерции вращающихся элементов инструмента; $M_{тр}$ – момент сил, препятствующий вращению резца, принятый равным моменту трения в его опорах; $d\varphi$ – элементарное перемещение.

Так как $d\varphi \neq 0$,

$$M_u + M_{тр} = 0; \quad (2)$$

$$M_u = J_o a, \quad (3)$$

где J_o – осевой момент инерции вращающихся элементов ротационного инструмента; a – угловое ускорение.

Зависимость $M_{тр}$ подшипников качения от скорости вращения, типа нагрузки и применяемой смазки по данным [5] имеет вид:

$$M_{тр} = M_o + M_p = f_q 10^{-7} (vn)^{2/3} D_o^3 + f_j P \left(\frac{P}{C_o} \right)^c D_o, \quad (4)$$

где M_o – момент трения, зависящий от конструкции подшипника, смазки и скорости вращения; M_p – момент трения, зависящий от нагрузки на подшипник; f_q, f_j, c – табличные коэффициенты; P – приведенная нагрузка на подшипник; C_o – динамическая грузоподъемность; v – кинематическая вязкость смазки.

Значение приведенной нагрузки P определяется величиной предварительного натяга P_H в опорах и коэффициентом динамичности k_q для заданных условий работы инструмента ($k_q = 1 \dots 2,5$).

Введя обозначение

$$k_1 = \sum_{i=1}^m (4,5 \cdot 10^{-7} \cdot f_q \cdot v^{2/3} \cdot D_o^3) \cdot i; k_2 = \sum_{i=1}^m \left[f_j \cdot P \left(\frac{P}{C_o} \right)^c \cdot D_o \right] \cdot i, \quad (5)$$

где m – количество подшипников в шпиндельном узле, получим решение уравнения (1) в виде

$$\tau = \frac{3J_o}{k_1} \left(\omega_p^{1/3} - \sqrt{\frac{k_2}{k_1}} \cdot \arctg \frac{\omega_p^{1/3}}{\sqrt{\frac{k_2}{k_1}}} \right) + C. \quad (6)$$

При граничных условиях

$$\begin{aligned} \tau_o = 0 &\rightarrow \omega_p = \omega_{p_o} \\ \tau = \tau_{ocm} &\rightarrow \omega_p = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

находим значение константы C :

$$C = -\frac{3J_o}{k_1} \left(\omega_{p_o}^{1/3} - \sqrt{\frac{k_2}{k_1}} \cdot \operatorname{arctg} \frac{\omega_{p_o}^{1/3}}{\sqrt{\frac{k_2}{k_1}}} \right). \quad (8)$$

Тогда уравнение (6) после преобразований примет вид:

$$\tau = \frac{3J_o}{k_1} \left[\left(\omega_p^{1/3} - \omega_{p_o}^{1/3} \right) + \sqrt{\frac{k_2}{k_1}} \left[\operatorname{arctg} \frac{\omega_{p_o}^{1/3}}{\sqrt{\frac{k_2}{k_1}}} - \operatorname{arctg} \frac{\omega_p^{1/3}}{\sqrt{\frac{k_2}{k_1}}} \right] \right]. \quad (9)$$

С учетом (7)

$$\tau_{ocm} = \frac{3J_o}{k_1} \left(\sqrt{\frac{k_2}{k_1}} \cdot \operatorname{arctg} \frac{\omega_{p_o}^{1/3}}{\sqrt{\frac{k_2}{k_1}}} - \omega_{p_o}^{1/3} \right). \quad (10)$$

По зависимостям (9) и (10) выполнены расчеты для наиболее широко применяемых конструкций ротационного инструмента и технически приемлемых условий их эксплуатации: $D_o \cdot 10^{-3} = 27,5 \dots 39$ мм; $v = 10 \dots 100$ мм²/с; $C_o = 6,3 \dots 40$ кН; $P_H = 0,25 \dots 2,5$ кН; $\omega_{p_o} = 50 \dots 500$ с⁻¹; $J_o = 0,01 \dots 0,03$ кг·м²; $f_q = 1,5 \dots 4$; $f_j = 0,001 \dots 0,0012$; $c = 0,33$.

Анализ зависимости (9) и результатов расчета показал, что с ростом ω_{p_o} увеличивается в большей степени τ_{ocm} для инструмента на радиально-упорных подшипниках в сравнении с инструментом с разделенными опорами. Это объясняется более высокими скоростными характеристиками радиально-упорных подшипников. Увеличение среднего диаметра подшипников D_o также в большей мере ведет к росту τ_{ocm} для инструмента на радиально-упорных подшипниках. В инструментах с разделенными опорами увеличение D_o в большей мере сопровождается увеличением потерь на трение, а значит и относительным снижением τ_{ocm} , чем ростом τ_{ocm} из-за увеличения момента инерции вращающихся частей инструмента.

С увеличением предварительного натяга P_H в подшипниках увеличивается доля пластической составляющей деформации и относительное проскальзывание тел качения в контакте. Это ведет к увеличению потерь на трение в опорах, их быстрому перегреву. Радиально-упорные подшипники особенно чувствительны к перегрузке, поэтому величину монтажного натяга в ротационных инструментах с их применением для чистовых операций следует выбирать в пределах 6...8 мкм для подшипников с внутренним диаметром 20...25 мм, а для полустовых операций - в пределах 8... 12 мкм.

Исследованы кинематические характеристики партии ротационных резцов, у которых передней опорой служат подшипники 5-436204ЕШ1, а задней - 6-36204Е. На специально разработанных установках контролировалась величина монтажного натяга при сборке, обеспечиваемые им усилие натяга и осевая жесткость. Данные замеров и результаты исследования скоростных характеристик резцов представлены в таблице.

Результаты исследования скоростных характеристик резцов

№ резца	Монтажный натяг, δ_0 , мкм	Усилие преднатяга, $P_{Н}$, Н	Осевая жесткость, J_0 , Н/мкм	Значение $M_{тр}$ при $\omega_{p_0} = 210 \text{ с}^{-1}$	Значение $\tau_{ост}$, с	
					$\omega_{p_0} = 210 \text{ с}^{-1}$	$\omega_{p_0} = 388 \text{ с}^{-1}$
1	3	200	142	65	0,292	0,37
2	7,2	600	180	77	0,23	0,304
3	12	1560	383	205	0,09	0,123
4	4	230	150	81	0,29	0,350
5	9,3	790	284	78	0,245	0,31
6	7	1700	305	247	0,07	0,105
7	8	695	282	97	0,303	0,36
8	10	915	306	132	0,224	0,272
9	10,5	1100	340	160	0,175	0,22
10	7	800	294	105	0,24	0,307

Анализ показал, что выбор величины натяга имеет большое значение для скоростных характеристик инструмента. Увеличение его выше оптимального (6...8 мкм) несколько повышает осевую жесткость, но резко растут потери на трение и падает значение $\tau_{ост}$. Указанными резцами выполнена обработка напыленных порошковых покрытий ПГ-СР3 и ПГ-СР4 на образцах в виде колец с различной величиной прерывистости. Некоторые результаты исследования кинематики процесса показаны на рис. 1.

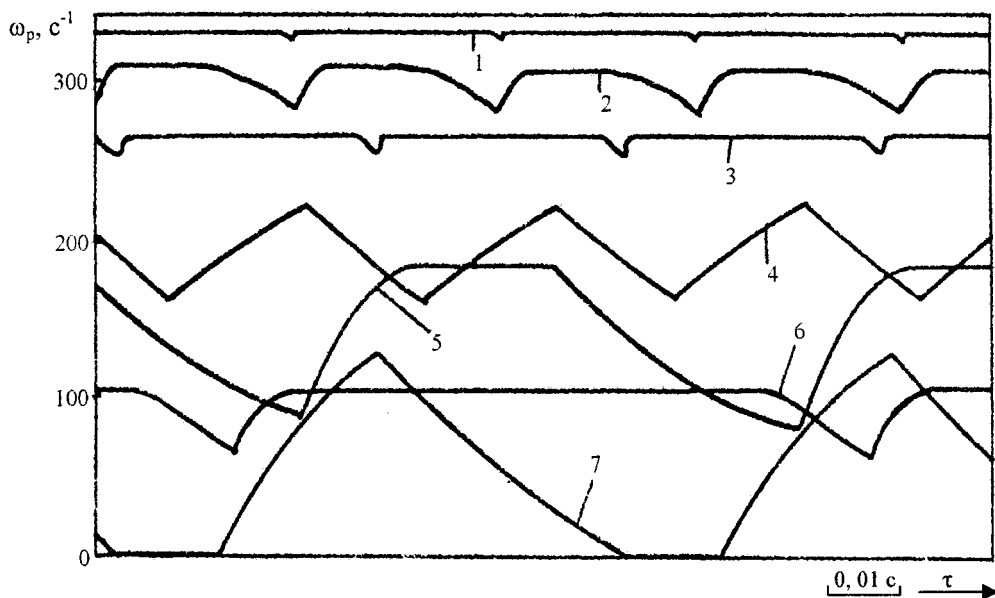


Рис. 1. Изменение скорости самовращения роторного резца при прерывистом точении на режимах:

$V = 10,6 \text{ м/с}$ – 1, 2; $V = 8,5 \text{ м/с}$ – 3, 4; $V = 4,2 \text{ м/с}$ – 5, 7; $V = 3,3 \text{ м/с}$ – 6;

β (прерывистость) 30° – 1, 3, 6; 180° – 2, 4, 5; 270° – 7; $M_{тр} = 0,058 \text{ Н}\cdot\text{м}$ – 1, 3, 5, 6; $M_{тр} = 0,095 \text{ Н}\cdot\text{м}$ – 2, 4, 7

Наблюдение за износом роторных резцов из твердых сплавов Т15К6 и ВК8 показало, что принципиального отличия в характере их износа нет. По обоим рабочим поверхностям лезвия на начальном этапе превалирует абразивный износ. С течением времени (после 2...3 минут) на задней поверхности проявляются элементы адгезионного износа. Накопление износа приводит к превалирующему износу по передней поверхности с последующим выходом на режущую кромку, постепенное осыпание кромки и появление микроразрушений в виде сколов и вырывов блоков инструментального материала. Вид режущей кромки со стороны передней поверхности после 5 минут обработки покрытия ПГ-СР4 (режимы: $v = 1,99 \text{ м/с}$; $S = 0,28 \text{ мм/об}$; $t = 0,25 \text{ мм}$) показан на рис. 2.

Выполненные исследования показали, что применение роторных резцов обеспечивает эффективную обработку покрытий твердостью до 50...52 HRC. При обработке покрытий твердостью 40...45 HRC стойкость роторного резца на порядок выше стойкости призматического даже при скорости резания последним в два раза ниже.

Применение более прочных и твердых инструментальных материалов всегда было ориентиром в повышении эффективности обработки резанием. Анализ физико-механических и эксплуатационных свойств инструментальных материалов показывает, что современные сверхтвердые материалы на основе кубического нитрида бора и алмаза являются наиболее перспективными в условиях обработки, харак-

терных для точения восстановленных деталей. За последние годы в легкой, пищевой, табачной, перерабатывающей и других отраслях появилось значительное количество импортной техники. Ресурс ее к настоящему времени выработался, а возможности переоснащения новым оборудованием ограничены.



Рис. 2. Износ лезвия ротационного резца при точении покрытия ПГ-СР4

Поэтому отмечается оживление на рынке услуг по ремонту и восстановлению такого оборудования. В частности, проблемным стал вопрос восстановления экструдеров в кондитерской промышленности. Применение нержавеющей сталей в конструкциях экструдера требует разделительного слоя из антифрикционного материала на контактных поверхностях. Чаще они выполняются наплавкой бронзовой ленты или порошка на контактную поверхность шнека. Нами выполнено восстановление шнека наплавкой бронзовыми электродами серии VacPac фирмы «ESAB» (Швеция). Последующая механическая обработка твердосплавными резцами из ВК8 не обеспечивало стойкости даже на 1 проход на длине винта 2180 мм шнека ВРФ200 на режимах $n = 40$ об/мин, $t = 0,3...0,4$ мм. Поэтому были использованы резцы, оснащенные пластинкой из киборита (ИСМ НАН Украины), композита 10 (гексанит - производство завода «Ильич», г. Санкт-Петербург) и эльбора (производство фирмы «Азид», г. Минск). Процесс обработки восстановленного шнека показан на рис. 3.

Результаты исследований обнаружили, что наиболее высокие результаты, особенно при первых проходах по корке, показали резцы из киборита и композита 10. Обработка велась всухую на режимах: $V = 1,2...2$ м/с; $S = 0,28$ мм/об; $t = 0,3...0,6$ мм. Режимы резания ограничивались жесткостью шнека и невозможностью применить люнеты и промежуточные опоры. Без переточки выполнялось до 5 проходов с обеспечением шероховатости обработанной поверхности по параметру R_a не более 1,6 мкм.

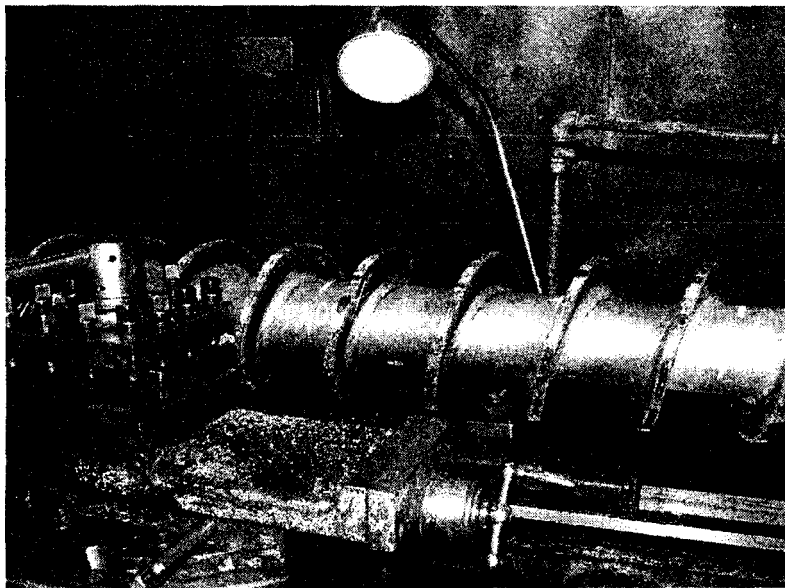


Рис. 3. Обработка восстановленного шнека экструдера резцом из киборита

Указанные выше марки поликристаллических сверхтвердых материалов использованы при точении делителя теста ВХДУ, рабочая поверхность которого восстановлена нанесением порошка БрАЖ9 фракции 315/250 с последующим оплавлением. На чистовых проходах заметного различия в стойкости всех марок поликристаллических сверхтвердых материалов не наблюдалось. Шероховатость обработанной поверхности составляла по параметру R_a 0,8...0,63 мкм; не требовалось дополнительной чистовой обработки шлифованием, как при точении твердосплавными резцами.

Ввиду значительного роста затрат на режущий инструмент и механическую обработку деталей, связанных с ростом требований к точности и качеству обработанных поверхностей и широкого применения высокопрочных материалов, важную роль в повышении эффективности механической обработки приобретают процедуры испытания и сертификации инструмента.

Указанные процедуры позволяют значительно повысить качество и надежность выпускаемых инструментов, что подтверждается и опытом работы испытательного центра ФТИ НАН Беларуси. Область аккредитации центра охватывает лезвийные инструменты (резцы токарные, фрезы) и алмазно-абразивные. Испытываемые показатели определяются нормативной документацией на инструменты и стандартами по безопасности (СТБ ГОСТ Р 51140-2000, ГОСТ30513-97 и др.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. Великобритании № 166 от 17 января 1868 г. Working Wood and Metal / Napier J.M.
2. Коновалов Е.Г., Сидоренко В.А., Соусь А.В. Прогрессивные схемы ротационного резания металлов. - Мн., 1972.
3. Лебедев В.Я. Разработка и внедрение технологических процессов ротационной обработки деталей с прерывистыми поверхностями: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Мн., 1989.
4. Новые методы испытания и обработки материалов / В.А. Сидоренко, Г.П. Макаревич, В.И. Лукьяненко и др.-Мн., 1975. - С. 271 -284.
5. Фигатнер А.М. Расчет и конструирование шпиндельных узлов с подшипниками качения металлорежущих станков. - М., 1978.