

УДК 621.9

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К АНАЛИЗУ И ПОИСКУ ПУТЕЙ ЗАМЕНЫ ОПЕРАЦИЙ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ТОЧЕНИЕМ

*канд. техн. наук Л.В. КУРЧ, А.А. БАРКУН, И.А. ВАРВАРИНА
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Рассмотрены методологические подходы к анализу и поиску путей замены операций финишной обработки точением. Представлен технико-экономический анализ новых прогрессивных технологий точения в условиях Минского тракторного завода с использованием станков модели 16К20. Исследования проводились с целью замены операций шлифования операциями точения.

Показана экономическая целесообразность получения шероховатости наружной цилиндрической поверхности вращения с малым вылетом и непрерывной поверхностью резания в пределах $Ra\ 0,6...0,8$ методом точения. При этом возможно использование таких широко распространенных станков, как 16К20, парк которых значителен на предприятиях Беларуси.

Введение. Среди перспективных технологий обработки материалов следует отметить точение. Освоение инструментальной промышленностью твердых и сверхтвердых инструментальных материалов, обладающих к тому же высокой температурной стойкостью, обусловило альтернативу процессу шлифования – точение твердых материалов. Область применения – замена точением операций шлифования закаленных деталей с твердостью от $HRC > 47...65$.

До настоящего времени основным процессом обработки твердых материалов было шлифование. Сегодня благодаря широкому применению керамических инструментальных материалов, а также инструмента из кубического нитрида бора обработка термоупрочненной стали стала вполне осуществима на станках токарной группы. При сопоставимых показателях точности обработки и качества получаемой поверхности точение экономичнее шлифования.

Цель замены шлифования точением – увеличение экономической эффективности процесса обработки за счет ряда факторов. Один из самых главных – уменьшение трудоемкости процесса обработки. Более высокая гибкость точения обеспечивает обработку большой номенклатуры сложнопрофильных деталей, в то время как на шлифовальном станке такая обработка требует замены кругов и подналадки станка. Время обработки при точении в несколько раз меньше, чем при шлифовании. Кроме того, процесс точения происходит на том же станке, на котором осуществляется и обычная токарная обработка незакаленных деталей, что тоже повышает гибкость и универсальность процесса. Немаловажными факторами являются: отсутствие необходимости применения при обработке СОЖ; менее затратный процесс утилизации стружки по сравнению с отходами после шлифования. Кроме того, увеличение экономичности определяется съемом материала (при точении в три раза меньше, чем при шлифовании; точность обработки идентична как при точении, так при шлифовании) [1, 2]. Исключается внутрицеховая транспортировка деталей, уменьшаются припуски, экономятся производственная площадь, электроэнергия, отпадает потребность в специалистах-шлифовщиках. При крупносерийном производстве возможна и целесообразна автоматизация и роботизация процесса. Вышеперечисленные факторы позволяют говорить о том, что точение экономичнее шлифования на 30...50 %.

Основная часть. С целью удешевления процесса производства, исключения из маршрута обработки детали 1525-3405352 «Тяга шаровая» операций круглого шлифования, уменьшения трудоемкости

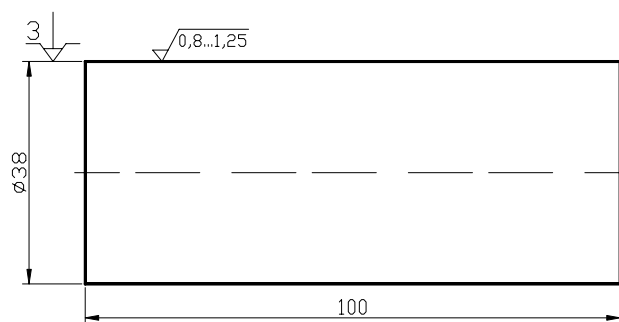


Рис. 1. Заготовка – вал $\varnothing 38$ из стали У8А

процесса механической обработки на операциях круглого шлифования на РУП «МТЗ» были проведены испытания. Исследования проводились в лабораторных условиях на токарно-винторезном станке 16К20. Возможность использования такого широко распространенного в парке оборудования МТЗ станка была одним из необходимых условий проведения данных испытаний.

В качестве заготовки (рис. 1) использовался вал $\varnothing 38$ из стали У8А, закаленный до твердости 60 HRC. Геометрические параметры детали (обработка резанием после закалки): шероховатость поверхности $Ra\ 0,8...1,25$; допуск на обрабатываемый диаметр – 0,1 мм.

Заготовка устанавливалась в трехкулачковый патрон и обрабатывалась без охлаждения.

Инструментальный материал для точения – режущая керамика и кубический нитрид бора. Каждый из материалов имеет свои преимущества и недостатки. Керамика существенно дешевле, но плохо воспринимает ударные нагрузки. Кубический нитрид бора менее восприимчив к ударным нагрузкам, но более дорогостоящий материал. Точение проводилось резцом, изготовленным в подразделении МТЗ «СИИТО». Материал пластины – кубический нитрид бора, геометрия пластины – ромб с углом заострения 35° и радиусом при вершине 1,8 мм. Вылет заготовки после закрепления в патроне составил 60 мм (рис. 2), что способствовало отсутствию вибраций при обработке. Также отсутствию вибраций при обработке способствовало наличие непрерывной поверхности резания.

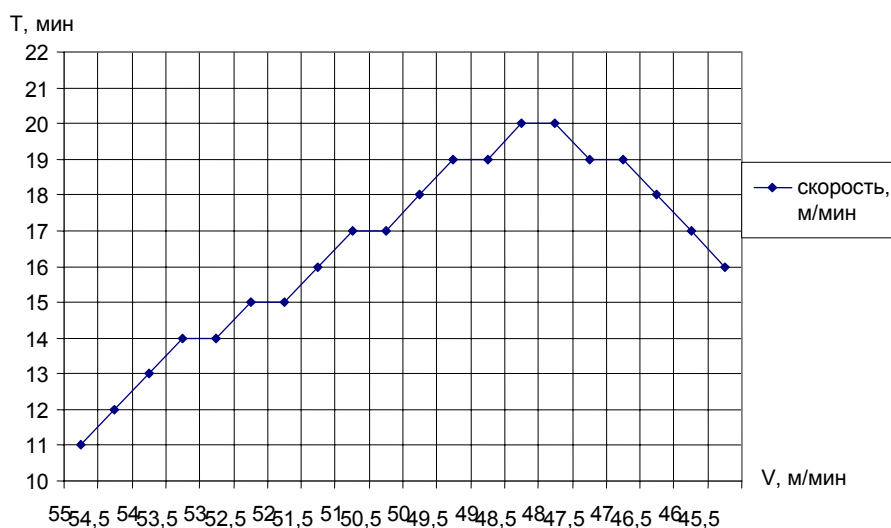


Рис. 2. График зависимости стойкости СНП от скорости резания

В литературных источниках, отражающих тему точения, приводятся режимы резания для обеспечения шероховатости $Ra\ 0,6...0,8$: глубина резания не превышает 0,1...0,5 мм при скорости резания 100...200 м/мин и подаче 0,05...0,15 мм/об.

Для назначения правильных режимов резания, которые бы учитывали возможности используемого станка, в частности его динамическую жесткость, величина которой обуславливает возникновение вибраций при точении, и стойкость инструмента, были проведены предварительные эксперименты, а затем – статистические расчеты.

Особое внимание необходимо уделить износу по задней поверхности сменной неперетачиваемой пластины (СНП), который оказывает значительное влияние на ухудшение качества поверхности или выход за пределы поля допуска. На стойкости инструмента в значительной степени оказывает влияние скорость резания (V , м/мин). Протокол измерения стойкости СНП в зависимости от скорости обработки представлен в таблице 1. Исследования проводились на одном станке за 20 проходов для одной режущей кромки.

На предварительных испытаниях было выяснено, что оптимальная скорость, при которой не наблюдается износ резца на данном оборудовании, лежит в пределах 45...55 м/мин.

Таблица 1

Таблица результатов измерений стойкости СНП в зависимости от скорости обработки

№ прохода	Скорость обработки, м/мин	Стойкость режущей кромки, мин	№ прохода	Скорость обработки, м/мин	Стойкость режущей кромки, мин
1	55	11	11	50	18
2	54,5	12	12	49,5	19
3	54	13	13	49	19
4	53,5	14	14	48,5	20
5	53	14	15	48	20
6	52,5	15	16	47,5	19
7	52	15	17	47	19
8	51,5	16	18	46,5	18
9	51	17	19	46	17
10	50,5	17	20	45,5	16

График, приведенный на рисунке 2, наглядно показывает, что оптимальной скоростью резания для данного оборудования и СНП является скорость 48 м/мин. При этой скорости одна режущая кромка СНП может обработать 20 деталей, при этом износ пластины наблюдаться не будет.

Таким образом, из-за отсутствия износа по задней поверхности пластины не наблюдалось значительное увеличение температур в зоне резания, а следовательно, пассивные усилия резания не возрастали значительно и качество поверхности не ухудшалось. Сход стружки был спокойным, однонаправленным. Стружка сливная, тонкая и ломкая.

Исходя из анализа полученных результатов (см. табл. 1 и рис. 2), оптимальная скорость резания для данных условий точения 48 м/мин.

На следующем этапе был произведен статистический анализ, который показал, что такой показатель, как стойкость СНП, подчиняется закону нормального распределения (закону Гаусса). Также было определено среднестатистическое значение $\bar{x}$ стойкости одной грани пластины и, с вероятностью 99,73 %, определить поле рассеивания стойкости пластин ω . Исследования проводились на одном станке за 20 проходов для одной режущей кромки. Протокол измерения стойкости СНП при оптимальной скорости резания 48 м/мин представлен в таблице 2.

Таблица 2

Таблица результатов измерений стойкости СНП в зависимости от скорости обработки

№ прохода	Стойкость режущей кромки, мин	№ прохода	Стойкость режущей кромки, мин	№ прохода	Стойкость режущей кромки, мин	№ прохода	Стойкость режущей кромки, мин
1	17	6	20	11	19	16	18
2	19	7	21	12	23	17	22
3	19	8	18	13	21	18	17
4	20	9	21	14	20	19	16
5	20	10	22	15	24	20	23

В соответствии с [3, с. 624 – 686] были проведены необходимые статистические расчеты. Подсчет частот и статистических характеристик представлен в таблице 3.

Таблица 3

Результаты расчета эмпирических и теоретических частот нормального распределения

Интервал	m_i	Y_i	Y'_i	$m_i Y'_i$	$m_i (Y'_i)^2$	t	$\Phi(t)$	$F(x)$	m'_i	m_i^*
15,5...16,5	1	16	-4	-4	16	-1,64992	-0,4505	0,0495	0,99	1
16,5...17,5	2	17	-3	-6	18	-1,17851	-0,3643	0,1357	1,724	2
17,5...18,5	2	18	-2	-4	8	-0,70711	-0,2611	0,2389	2,064	2
18,5... 19,5	3	19	-1	-3	3	-0,2357	-0,0948	0,4052	3,326	3
19,5...20,5	4	20	0	0	0	0,235702	0,0948	0,5948	3,792	4
20,5...21,5	3	21	1	3	3	0,707107	0,2611	0,7611	3,326	3
21,5...22,5	2	22	2	4	8	1,178511	0,3643	0,8643	2,064	2
22,5...23,5	2	23	3	6	18	1,649916	0,4505	0,9505	1,724	2
23,5...24,5	1	24	4	4	16	2,12132	0,4826	0,9826	0,642	1
Σ	20			0	90					20

m_i – частоты в каждом из интервалов; Y_i – середина соответствующего интервала; $Y'_i = (Y_i - Y_0)/h$, при этом Y_0 – новое начало отсчета, за которое принимается середина интервала, имеющего наибольшую частоту; $m_i Y'_i$ – момент первого порядка; $m_i (Y'_i)^2$ – момент второго порядка.

Среднее значение стойкости СНП $\bar{x}_{\text{ср}}$, определялось по формуле (1):

$$\bar{x} = y_0 - h \frac{\sum m_i y'_i}{\sum m_i} \quad (1)$$

и составило примерно 20 (деталей на одну режущую кромку СНП).

Среднее квадратичное отклонение параметра стойкости определялось по формуле (2):

$$s = h \sqrt{\frac{\sum m_i (y_i)^2}{\sum m_i} - \left(\frac{\sum m_i y_i}{\sum m_i}\right)^2}. \quad (2)$$

Поле рассеивания стойкости СНП с вероятностью в пределах 99,73 % для нормального распределения определяется по формуле: $\omega = 6s$; $\omega_{\text{баз}} = 6 \cdot 2,12 = 12,72 \approx 13$ (деталей на одну режущую кромку СНП).

Для построения кривой нормального распределения были рассчитаны теоретические частоты нормального распределения при помощи функции $\Phi(t)$:

$$t = \frac{x_{\text{нб}} - \bar{x}}{s},$$

где $x_{\text{нб}}$ – наибольшее значение данного интервала; $\bar{x}$ и s – среднее значение и среднеквадратическое отклонение.

Затем определены значения функции Лапласа, по которым для каждого интервала подсчитана интегральная функция

$$F(t) = 0,5 + \Phi(t).$$

По $F(t)$ теоретические частотности составят:

$$m_i = F(t) \cdot n.$$

Далее были сопоставлены эмпирическое распределение, предположительно принятое как нормальное, с теоретическим. Для этого в одних и тех же координатах были построены эмпирический полигон и кривая нормального распределения, что дало возможность судить о степени совпадения эмпирического распределения с теоретическим.

Для количественного сопоставления эмпирического и теоретического распределений использовали критерий согласия Пирсона (χ^2):

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^z \frac{(m_i - m'_i)^2}{m'_i},$$

где z – число сравниваемых частотностей; m_i и m'_i – эмпирическая и теоретическая частотности в i -том интервале.

Область допустимых значений критерия Пирсона, или область принятия гипотезы, характеризуется неравенством:

$$\chi_{\text{набл}}^2 < \chi_{\text{кр}}^2(\alpha, k),$$

где $\chi_{\text{набл}}^2$ – значение критерия, вычисленное по данным наблюдения; $\chi_{\text{кр}}^2(\alpha, k)$ – критические значения критерия при заданных α и k ; α – уровень значимости, в технике обычно 0,05.

Для проводимого расчета $\chi_{\text{кр}}^2(0,05, 2) = 6,0$.

Так как для данной пластины $0 < 6,0$, то можно утверждать, что распределение параметров стойкости пластин, проверенное по критерию Пирсона, соответствует нормальному закону распределения.

Кроме того, была произведена проверка соответствия статистических данных нормальному закону распределения и по критерию Романовского:

$$A = \frac{|\chi^2 - k|}{\sqrt{2k}}.$$

Если $A < 3$, то гипотеза принимается. Если $A \geq 3$, гипотеза отвергается. В данном случае $A = 1$, следовательно, эмпирическое распределение соответствует нормальному закону.

Исходя из рекомендаций по выбору режимов резания при глубине резания 0,25 мм на сторону ($n = 400$ об/мин и $V = 48$ м/мин) обрабатывали первую поверхность (рис. 3) за 24 прохода с подачей 0,1 мм/об.

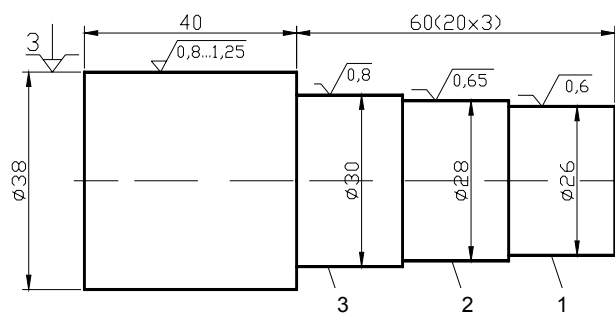


Рис. 3. Схема обработки

После каждого прохода получали шероховатость $Ra\ 0,6$. Вторую поверхность обрабатывали за 20 проходов с подачей $0,09\text{ мм/об}$. После каждого прохода получали шероховатость $Ra\ 0,65$. Третью поверхность обрабатывали за 16 проходов с подачей $0,075\text{ мм/об}$. После каждого прохода получали шероховатость $Ra\ 0,8$.

Для иллюстрации вышеприведенных тезисов об экономической эффективности замены операций круглого шлифования операциями точения приведем сравнительные режимы резания для операции круглого шлифования аналогичной детали.

Для получения шероховатости $Ra\ 0,8$ на станке 3М151 кругом $1600 \times 63 \times 305\ 23\text{A } 16\text{ C } 1\ 5\text{ K } 1\ 35\text{ A}$ Кл 1 ГОСТ 24247-83 были приняты следующие режимы:

- припуск под обработку $a = 0,25\text{ мм}$; скорость круга $V = 35\text{ м/с}$;
- поперечная подача шлифовального круга $S = 0,48\text{ мм/мин}$;
- количество оборотов изделия $n_d = 250\text{ об/мин}$;
- количество оборотов шпиндельной бабки $n = 1590\text{ м/мин}$.

Для детали, аналогичной приведенной на рисунке 3, время обработки поверхности (длина обработки 20 мм) рассчитывается по формуле:

$$t_o = \frac{La}{n_d S_{\text{non}}} k, \quad (3)$$

где L – длина обработки; a – припуск на сторону; n_d – частота вращения заготовки; S_{non} – поперечная подача в мм/об детали; k – коэффициент, учитывающий точность шлифования.

Основное время при круглом шлифовании $T_{\text{осн}}$ составило $0,61\text{ мин}$.

Для той же детали, но обрабатываемой по методу точения, основное время рассчитывается по формуле (4):

$$T_{\text{осн}} = \frac{L}{Sn}, \quad (4)$$

где L – длина обработки; S – подача в мм/об ; n – частота вращения заготовки.

Для случая обработки детали с длиной обработки 60 мм , шероховатостью обработки $Ra\ 0,8$ на станке 16К20 за 1 проход с припуском $0,25\text{ мм}$ основное время составило $0,66\text{ мин}$.

Получили, что $T_{\text{осн}}$ при обработке по методу точения практически равно $T_{\text{осн}}$ при обработке шлифованием. Но при обработке шлифованием дополнительно к $T_{\text{осн}}$ прибавляется значительная величина вспомогательного времени на замену и подналадку шлифовальных кругов.

Закключение. Метод точения в отличие от шлифования не требует значительного вспомогательного времени, более универсален по номенклатуре обрабатываемых деталей и является более производительным. Экономически целесообразнее получение шероховатости наружной цилиндрической поверхности вращения с малым вылетом и непрерывной поверхностью резания в пределах $Ra\ 0,6 \dots 0,8$ методом точения. При этом возможно использование таких широко распространенных станков, как 16К20, парк которых значителен на предприятиях Беларуси.

ЛИТЕРАТУРА

1. Koepfer, C. New «Ways» For Hard Turning / C. Koepfer // Modern Machine Shop. – 2003. – № 1.
2. Jochmann, S. Untersuchungen zur Prozess und Werkzeugauslegung beim Hochpraezisionshartdrehen / S. Jochmann. – Aachen, Shaker Verlag, 2001.
3. Лабораторный практикум по технологии машиностроения / В.В. Бабук [и др.]. – Минск: Выш. шк., 1983. – 220 с.

Поступила 31.05.2007