

мощностью, определяющим фактором которой будет являться скорость его вращения. Следовательно, при уменьшении частоты вращения шпинделя станка, мощность тепловыделения в зоне резания будет так же уменьшаться. Это приводит к дальнейшему повышению роли силового фактора в зоне резания и в итоге, росту предела выносливости детали.

Таким образом, среди методов абразивной обработки, с точки зрения обеспечения максимального предела выносливости, можно выделить глубинное шлифование. При любых режимах обработки данный метод обеспечивает повышение сопротивления усталости детали относительно заготовки. Причем чем выше силы резания в зоне обработки (ниже скорость вращения круга), тем повышение предела выносливости больше.

Полученные сведения по назначению условий механической обработки, исходя из требуемых значений пределов выносливости, могут быть непосредственно использованы в цеховых производственных условиях для обеспечения высоких эксплуатационных свойств обрабатываемых деталей.

Обеспечение качества поверхностного слоя и снижение технологической себестоимости при токарной обработке

Акинъшин Р.Н.
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
ruller003@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены проблемы, возникающие при точении заготовок из труднообрабатываемых материалов. Предложено использовать параметры шероховатости поверхности, оказывающие значительное влияние на эксплуатационные свойства деталей машин, для оценки качества поверхностного слоя. Приведены способы расчета указанных параметров при токарной обработке. Представлена методика выбора оптимального режима резания при точении, позволяющая снизить себестоимость обработки и обеспечить требуемые параметры качества поверхности.

Ключевые слова: токарная обработка, технологическая себестоимость, производительность обработки, качество поверхностного слоя, шероховатость поверхности

Разработка новых изделий в машиностроении, повышение их эксплуатационных характеристик связаны с освоением и использованием различных материалов, обладающих специфическими физическими, химическими и другими свойствами. Подобные сплавы (жаропрочные, жаростойкие, коррозионностойкие, высокопрочные, магнитные и т. п.) являются труднообрабатываемыми, что подразумевает большие затраты труда и материальных ресурсов на производство деталей из них. Несмотря на тенденцию к повышению точности заготовительных методов (литья, обработки давлением, порошковой металлургии) и получению готовых деталей без последующей механической обработки, доля обработки резанием по-прежнему занимает большую часть технологического процесса изготовления деталей. По одним данным 80...85% заготовок подвергаются обработке резанием, а ее трудоемкость достигает 50...60% и более от общей трудоемкости изготовления машиностроительных изделий [1], по данным другого источника [2], доля обработки резанием в технологическом процессе изготовления деталей по трудоемкости и производственным затратам составляет 40...60% общих затрат.

Целью работы является снижение технологической себестоимости токарной обработки заготовок из труднообрабатываемых материалов при гарантированном обеспечении качества поверхностного слоя деталей.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Анализ составляющих технологической себестоимости и способов ее снижения.
2. Анализ влияния условий обработки (режима резания, материала режущей части инструмента и его геометрических параметров) на качество поверхностного слоя (параметры

шероховатости).

3. Оптимизация условий токарной обработки заготовок из труднообрабатываемых сплавов на основе выявленных зависимостей с целью снижения технологической себестоимости и обеспечения требуемого качества поверхности.

Технологическая себестоимость включает в себя только затраты, связанные с выполнением технологического процесса [3]:

$$C_T = C_{\text{заг}} + C_3 + C_э + C_в + C_{\text{реж}} + C_m + C_{\text{об}} + C_{\text{п}} + C_{\text{пл}}; \quad (1)$$

где: $C_{\text{заг}}$ – стоимость исходной заготовки; C_3 – заработная плата рабочих; $C_э$ – затраты на силовую электроэнергию; $C_в$ – затраты на вспомогательные материалы (смазочно-охлаждающие жидкости и т.п.); $C_{\text{реж}}$ – затраты на режущий инструмент; C_m – затраты на мерительный инструмент; $C_{\text{об}}$ – затраты на эксплуатацию оборудования (амортизационные отчисления, затраты на ремонт и т. п.); $C_{\text{п}}$ – затраты на эксплуатацию приспособлений; $C_{\text{пл}}$ – затраты на амортизацию и содержание производственных площадей.

На основе анализа составляющих технологической себестоимости можно сделать вывод, что для уменьшения себестоимости токарной обработки заготовок из труднообрабатываемых материалов необходимо повышение производительности при обеспечении заданной стойкости режущего инструмента и параметров качества детали в соответствии с требованиями конструкторской документации.

В данной работе для определения качества поверхностного слоя используются параметры шероховатости поверхности: Ra – среднее арифметическое отклонение профиля; Rz – высота неровностей профиля по десяти точкам; R_{max} – наибольшая высота профиля; S_m – средний шаг неровностей профиля; t_p – относительная опорная длина профиля и параметр R_p – высота сглаживания профиля шероховатости.

При лезвийной обработке установлены следующие зависимости, отражающие взаимосвязь параметров шероховатости [5, 6]:

$$Ra = 0,2Rz, \quad (2)$$

$$R_{\text{max}} = 1,2Rz, \quad (3)$$

$$R_p = 0,65 Rz, \quad (4)$$

$$t_p = 0,006 p^{2,2}; \quad p \leq 60\%, \quad (5)$$

$$t_p = 100 \dots 0,0055 (100 - p)^{1,8}; \quad p > 60\%, \quad (6)$$

$$S_m \approx S_o; \quad (7)$$

где: p – уровень сечения профиля; S_o – подача на оборот, мм/об.

Расчет высотных параметров шероховатости при лезвийной обработке предполагается выполнять по следующим формулам, отражающим физическую картину формирования микронеровностей поверхностного слоя детали [3, 5, 6]:

$$Rz = h_1 + h_2 + h_3; \quad (8)$$

где: h_1 – составляющая профиля шероховатости, определяемая геометрией и кинематикой перемещения рабочей части инструмента, мкм; h_2 – составляющая профиля шероховатости, вызванная колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности, мкм; h_3 – составляющая профиля шероховатости, обусловленная пластическими деформациями в зоне контакта инструмента и заготовки, мкм.

В настоящее время получены общепринятые зависимости только для определения геометрической составляющей профиля шероховатости h_1 , для определения остальных слагаемых в (8) таких зависимостей нет.

В [6] расчет величины пластического оттеснения при лезвийной обработке в зоне контакта инструмента и заготовки предлагается выполнять по формуле:

$$b_{\text{сдв}} = 0,5\rho(2 \tau_{\text{сдв}} / \sigma_T - 1); \quad (9)$$

где: ρ – радиус режущей кромки инструмента, мкм; $\tau_{\text{сдв}}$ – прочность обрабатываемого материала на сдвиг, МПа; σ_T – предел текучести обрабатываемого материала, МПа.

В рамках разрабатываемой методики предполагается использовать вместо величин $\tau_{\text{сдв}}$ и σ_T средние значения касательных и нормальных напряжений на поверхности инструмента,

рассчитанные на основе современных представлений теории резания [1, 7-10].

Так, касательные напряжения в условной плоскости сдвига при точении можно определить следующим образом [7, 9, 10]:

$$\tau = P_z / [a b (\operatorname{ctg} \varphi_y + \operatorname{tg} (\varphi_y + \eta - \gamma))], \quad (10)$$

$$\tau = P_z \cos(\varphi_y + \eta - \gamma) \sin \varphi_y / [a b \cos(\eta - \gamma)]; \quad (11)$$

где: P_z – тангенциальная составляющая силы резания, Н; a – толщина срезаемого слоя, мм; b – ширина срезаемого слоя, мм; φ_y – угол наклона условной плоскости сдвига; η – средний угол трения на передней поверхности инструмента; γ – передний угол инструмента.

$$\sigma_{\text{ср.и}} = \tau_{\text{ср.и}} / \mu, \quad (13)$$

где: μ – средний коэффициент трения на передней поверхности инструмента.

$$\mu = \operatorname{tg} \eta. \quad (14)$$

Для определения среднего коэффициента трения в работе [10] приведена следующая зависимость, полученная на основе гипотезы о минимуме мощности стружкообразования:

$$\mu = 1 - \operatorname{tg} (\varphi_y - \gamma). \quad (15)$$

Длина контакта стружки с передней поверхностью инструмента [7, 9, 10]:

$$c = a k_a^{0,1} [k_a (1 - \operatorname{tg} \gamma) + 1/\cos \gamma]; \quad (16)$$

где: k_a – коэффициент усадки стружки.

$$k_a = \cos(\varphi_y - \gamma) / \sin \varphi_y. \quad (17)$$

При расчете угла наклона условной плоскости сдвига можно воспользоваться формулой [8]:

$$\varphi_y = \pi/2 - \operatorname{arctg} [(1,015 (\eta_0 E_1 b / a)^{0,25} + \cos \gamma - \sin \gamma) / v^{0,355} (\cos \gamma + \sin \gamma)] \quad (18)$$

где: η_0 – упругая постоянная; v – скорость резания, м/с.

$$\eta_0 = (1 - \mu_1^2) / E_1 + (1 - \mu_2^2) / E_2, \quad (19)$$

где: μ_1, μ_2 – коэффициенты Пуассона обрабатываемого и инструментального материалов;

E_1, E_2 – модули упругости обрабатываемого и инструментального материалов, МПа.

Из формул (10, 11) следует, что для определения напряжений в зоне резания необходимо значение составляющей силы резания P_z . В настоящее время, по мнению автора, не существует теоретических зависимостей, позволяющих с достаточной точностью априорно определять силу резания. Поэтому в рамках рассматриваемой методики предлагается тангенциальную составляющую силы резания P_z определять по эмпирическим формулам вида:

$$P_z = C_p t^x S_o^y v^n; \quad (20)$$

где: C_p, x, y, n – постоянные для конкретных условий обработки; t – глубина резания, мм;

S_o – подача на оборот, мм/об; v – скорость резания, м/мин.

Зависимость (20) необходимо будет получать экспериментальным путем для конкретного обрабатываемого материала и условий обработки или использовать справочные данные [11, 12].

Для одновременного снижения интенсивности износа инструмента, повышения производительности и обеспечения требуемых параметров шероховатости предлагается осуществлять обработку заготовок при режиме резания, обеспечивающем оптимальную температуру в зоне резания.

Понятие оптимальной температуры резания было введено профессором А.Д. Макаровым, и им был сформулирован закон ее постоянства [13]: оптимальным скоростям резания $V_{\text{Опт}}$ (для заданного материала режущей части инструмента) при различных комбинациях скорости резания, подачи и глубины резания соответствует постоянная температура в зоне резания (оптимальная температура резания).

При оптимальной температуре резания, как показывают экспериментальные данные, полученные А.Д. Макаровым [13], наблюдаются минимум интенсивности износа инструмента и максимальный путь резания, пройденный инструментом за период стойкости (т.е. за период стойкости инструмент обрабатывает наибольшее количество заготовок), минимальная величина высотных параметров шероховатости, а также наименьшее изменение (как по глубине, так и интенсивности) физико-механических свойств обрабатываемого материала в по-

верхностном слое.

Оптимальная температура в зоне резания соответствует температуре структурно-фазовых превращений обрабатываемого материала [2]: при обработке углеродистых, легированных и жаропрочных сталей – температуре структурно-фазового α - γ превращения; при обработке титановых сплавов – температуре начала рекристаллизации; при обработке жаропрочных сплавов на никелевой основе – температуре точки Кюри-Курнакова.

Расчет температуры резания можно выполнить по формуле [7]:

$$T_{\text{рез}} = \tau [k_a + 1/k_a - 2\sin\gamma] / C_v \cos\gamma + 0,75 \tau_{\text{ср-и}} (v \text{ с})^{0,5} / C_v (k_a \omega)^{0,5}; \quad (21)$$

где: C_v – удельная объемная теплоемкость, Дж/К·м³; ω – коэффициент температуропроводности, м²/с.

Представленные формулы (9 - 21) не являются общепринятыми, их вывод основан на использовании целого ряда допущений и упрощении реального процесса резания, поэтому расчеты, выполненные по данным формулам, имеют определенные погрешности. Использование рассмотренных зависимостей при выборе оптимальных условий обработки требует экспериментальной проверки.

Разрабатываемая методика повышения эффективности лезвийной обработки заготовок из труднообрабатываемых материалов заключается в определении множества режимов резания (t_i, S_{oi}, v_i), при которых температура в зоне резания соответствует оптимальной для выбранного материала, а величины параметров шероховатости обработанной поверхности достигают значений, обеспечивающих заданные эксплуатационные свойства детали (или значений, заданных в технических требованиях чертежа). Из полученного множества параметров режима резания (t_i, S_{oi}, v_i), удовлетворяющих принятым ограничениям, выбираются такие (t_k, S_{ok}, v_k), при которых основное время обработки минимально.

Таким образом, данная методика позволяет определить параметры режима резания, которые обеспечивают максимальную производительность и требуемые параметры качества поверхностного слоя.

Методика предусматривает оптимизацию всего технологического маршрута обработки поверхности, от чистовых до черновых рабочих ходов.

Расчеты для определения оптимального режима резания выполняются с помощью программы *Microsoft Office Excel*. Использование указанного программного продукта должно упростить применение методики в инженерной практике, так как он является широко распространенным и общедоступным.



Рисунок 1. Графики зависимости тангенциальной составляющей силы резания, Н (1); касательных напряжений в условной плоскости сдвига, МПа (2); температуры резания, °С (3), от скорости резания при точении стали 40X ($t = 1,0$ мм; $S_0 = 0,1$ мм/об)



Рисунок 2. Графики зависимости коэффициента трения (1); R_z , мкм (2) и геометрической составляющей R_z , мкм (3), от скорости резания при точении стали 40X ($t = 1,0$ мм; $S_0 = 0,1$ мм/об)

На рисунках 1 ... 4 приведены графики изменения тангенциальной составляющей силы резания P_z , касательных напряжений в условной плоскости сдвига τ , температуры резания $T_{\text{рез}}$, параметра шероховатости P_z как суммы двух составляющих h_1 и h_3 , коэффициента трения на передней поверхности инструмента в зависимости от скорости резания V при посто-

янных глубине резания t и подаче на оборот S_0 при точении сталей 40X, 12X18H10T. Графики построены на основе значений, рассчитанных в программе *Microsoft Office Excel* по рассмотренным ранее формулам (9 - 21).



Рисунок 3. Графики зависимости тангенциальной составляющей силы резания, Н (1); касательных напряжений в условной плоскости сдвига, МПа (2); температуры резания, °С (3), от скорости резания при точении стали 12X18H10T ($t = 1,0$ мм; $S_0 = 0,1$ мм/об)



Рисунок 4. Графики зависимости коэффициента трения (1); R_z , мкм (2) и геометрической составляющей R_z , мкм (3), от скорости резания при точении стали 12X18H10T ($t = 1,0$ мм; $S_0 = 0,1$ мм/об)

Полученные графики параметров, определяющих процесс резания металла, и параметра качества образованной поверхности хорошо согласуются с общепринятым характером их изменения в процессе обработки при варьировании режимов резания, что свидетельствует о том, что представленным формулы удовлетворительно описывают процесс резания.

Выводы

При оценке качества обработанной поверхности можно ограничиться рассмотрением параметров шероховатости, оказывающих значительное влияние на эксплуатационные свойства деталей машин.

Влияние режимов обработки на параметры процесса резания и качество поверхностного слоя детали с достаточной для инженерных расчетов точностью описывается математическими зависимостями.

Рассмотренная методика позволит в производственных условиях для конкретного обрабатываемого материала при выбранных геометрии и материале режущей части инструмента определять рациональный режим резания, обеспечивающий максимальный путь резания инструмента (максимальное количество заготовок, обработанных за период стойкости инструмента), требуемые параметры качества сформированной поверхности, повышение производительности и, как следствие, снижение технологической себестоимости токарной обработки.

Литература

1. Физика и оптимизация резания материалов / Старков В.К.: М., Машиностроение, 2009 - 640 с.
2. Ресурсосберегающие технологии механической обработки труднообрабатываемых материалов / Касимов Л.Н.: Уфа, ООО «Дизайн ПолиграфСервис», 2003 - 182 с.
3. Научные основы технологии машиностроения / Суслов А.Г., Дальский А.М. М.: Машиностроение, 2002 - 684 с.
4. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. М.: Машиностроение, 1988 - 240 с.
5. Инженерия поверхности деталей / под ред. А.Г. Суслова / Суслов А.Г., Безъязычный В.Ф., Панфилов Ю.В. и др М.: Машиностроение, 2008 - 320 с.
6. Качество машин: Справочник. В 2-х т. Т. 1 / Суслов А.Г., Браун Э.Д., Виткевич Н.А. и др. М.: Машиностроение, 1995 - 256 с.
7. Резание материалов. Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании: учебник для техн. вузов / Васин С.А., Верещака А.С., Кушнер В.С. М.: Изд-во МГТУ им.

- Н.Э. Баумана, 2001 - 448 с.
8. Разработка методологии управления режимными параметрами и процессом изнашивания инструментов как основы повышения эффективности лезвийной обработки: дис. д-ра техн. наук. / Грубый С.В. М., 2004 - 535 с.
 9. Теория резания: учебник / Ящерицын П.И., Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Минск.: Новое знание, 2006 - 512 с.
 10. Режимы резания труднообрабатываемых материалов. Справочник / Гуревич Я.Л., Горохов М.В., Захаров В.И. и др. М.: Машиностроение, 1986 - 240 с.
 11. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976 - 278 с.

Повышение эффективности процессов сборки роторов газотурбинных двигателей на основе технологии имитационного моделирования

к.т.н. Тимофеев М. В., к.т.н. Тимофеева Е. В.
РГАТУ, Рыбинск
8(4855)22-20-91, tadiom@rsatu.ru

Аннотация. Работа направлена на совершенствование технологии сборки ротора ГТД смешанного типа, который является одной из наиболее распространённых в настоящее время конструкций.

Ключевые слова: ротор ГТД, сборка, имитационное моделирование

Для обеспечения эксплуатационных свойств роторов смешанного типа необходимо наличие силового замыкания их деталей, сопрягающихся друг с другом, которое вызывает деформации как самих деталей роторного пакета, так и их контактирующих поверхностей.

В современном авиадвигателестроении к точности сборки роторов предъявляются очень жесткие требования. Однако несмотря на то, что наиболее ответственные детали ГТД уже сейчас изготавливаются фактически с максимально достижимой в производстве точностью, при сборке даже хорошо освоенных серийных авиационных двигателей требуемая точность достигается методами неполной взаимозаменяемости, а также за счет осуществляемых вручную пригонки, попарного или индивидуального подбора деталей. При этом количество нуждающихся в доработке изделий может достигать 20...80%, что вынуждает производить многочисленные повторные сборки, подбирая опытным путём детали или производя их пригонку. Такой процесс сборки практически невозможно автоматизировать, а характеристики собранного ротора невозможно предсказать даже в том случае, если известны действительные размеры всех собираемых деталей.

Специфической особенностью роторов ГТД является то, что многие их детали (например, диски и кольца) могут устанавливаться в изделии в разных относительных положениях, равноценных с конструктивной точки зрения. Однако наличие макроотклонений на контактирующих поверхностях приводит к тому, что, изменяя угловое положение деталей друг относительно друга, можно получить варианты ротора с различными характеристиками, в том числе не удовлетворяющие заданным требованиям точности. Технологическая сборка представляет собой процесс формирования действительной сборочной оси ротора путем подбора оптимального относительного расположения его деталей. Исправить сформированную таким образом ось ротора в дальнейшем можно только путем разборки ротора и разворотом или заменой его деталей. Такой процесс чрезвычайно трудоёмок и снижает качество собираемого изделия, поскольку после осуществления разворота деталей для взаимной компенсации их погрешностей необходимо каждый раз заново обрабатывать с высокой точностью отверстия под призонные болты, соединяющие детали ротора, увеличивая их диаметр и заменяя сами болты.

Одним из крупных резервов снижения себестоимости изготовления ГТД и улучшения их эксплуатационных характеристик является организация их одноразовой бездowodочной сборки. А одним из главных условий обеспечения одноразовой сборки является наличие адекватных математических моделей сборочного процесса. Их использование позволяет