

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЗУБОШЛИФОВАНИЯ

Иванова Т.Н.

*Чайковский филиал Пермского национального исследовательского политехнического университета;
Институт механики ФГБУН «Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН», г. Ижевск*

Ключевые слова: зубошлифование, шлифовальный круг, зубчатое колесо, температура, смазочно-охлаждающей жидкости.

Аннотация. Зубошлифование наиболее производительной метод абразивной обработки, обеспечивающий получение зубчатых колес 3 - 8 степеней точности. Однако нарушение температурного режима шлифования приводит к появлению на поверхностях профиля зубьев прижогов. Поэтому исследование причин, порождающих дефекты, и изыскание путей их устранения являются актуальными. Проведены теоретические и экспериментальные исследования тепловых явлений при зубошлифовании. Даны рекомендации по выбору режимов шлифования, характеристик абразивных инструментов с учетом безприжогового состояния рабочей поверхности зубчатого колеса. Большое значение на эффективность процесса шлифования зубчатых колес оказывает правильный выбор смазочно-охлаждающей жидкости СОЖ и способ ее подвода. Установлено, что наилучшие результаты по снижению шероховатости обработанной поверхности показывают масляные СОЖ со специальными присадками. Даны рекомендации эффективных жидкостей и их иностранных аналогов.

TECHNOLOGICAL FEATURES OF GEAR GRINDING

Ivanova T.N.

*Tchaikovsky branch of Perm National Research Polytechnic University, Tchaikovsky;
Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of
Sciences, Institute of Mechanics, Izhevsk*

Keywords: gear grinding, grinding wheel, gear wheel, temperature, coolant.

Abstract. Gear grinding is the most productive method of abrasive processing, which provides the production of gears of 3-8 degrees of accuracy. However, violation of the grinding temperature regime leads to the appearance of cauterized teeth on the profile surfaces. Therefore, the study of the causes of defects and finding ways to eliminate them are relevant. Theoretical and experimental studies of thermal phenomena during tooth grinding have been carried out. Recommendations are given on the choice of grinding modes and characteristics of abrasive tools, taking into account the non-flat state of the working surface of the gear wheel. The correct choice of coolant coolant and the method of its supply is of great importance for the efficiency of the gear grinding process. It was found that the best results for reducing the roughness of the treated surface are shown by oil-based coolant with special additives. Recommendations of effective liquids and their foreign analogues are given.

При шлифовании зубьев не зависимо от типов применяемых кругов предъявляются высокие требования к качеству поверхности. Поэтому выбираемые режимы шлифования и характеристики абразивных инструментов должны гарантировать отсутствие прижогов, изменений структуры и микротвердости обработанной поверхности [1-7].

Температура в зоне шлифования профиля зубчатого колеса не зависимо от типа шлифовального инструмента будет

$$Q_u - Q_0 = \frac{q}{2} \sqrt{\frac{2\pi h}{\lambda\gamma CV}}, \quad (1)$$

где Q_u – температура в зоне контакта; Q_0 – начальная температура детали; q – плотность теплового потока; λ – коэффициент теплопроводности материала детали; γ – удельный вес детали; C – удельная теплоемкость материала обрабатываемой детали; V – скорость круга; $2h$ – ширина режущей кромки.

Например, при шлифовании зубчатых колес червячным абразивным кругом, учитывая то, что плотность теплового потока q и тангенциальная составляющая силы резания P_z , отнесенная к одной стороне зуба, будут

$$q = \frac{P_z V_{кр}}{JS} \text{ и } P_z = 6,2 s_p^{0,8} s_{np}^{0,2} m, \quad (2)$$

где $V_{кр}$ – окружная скорость червячного шлифовального круга по наружному диаметру; J – механический эквивалент теплоты; S – площадь пятна контакта боковой поверхности витка абразивного червяка шлифовального круга с профилем зуба; m – модуль шлифуемого зубчатого колеса; s_p – радиальная подача; s_{np} – продольная подача.

После подстановки выражений (2) в (1) получим температуру в зоне шлифования зубчатых колес червячным абразивным кругом:

$$Q = \frac{4 \cdot 10^4 s_p^{0,6} s_{np}^{0,2}}{(27 s_p^{0,5} + s_{np}) \sqrt{\lambda\gamma C}} K_D K_Z K_m K_n, \quad (3)$$

где K_D , K_Z , K_m , K_n – экспериментальные коэффициенты, учитывающие соответственно изменение диаметра шлифовального круга D при износе, числа зубьев z , модуля m и частоты вращения круга n .

Распределение температуры по глубине при шлифовании червячным кругом можно рассчитать по формуле:

$$Q_y = \frac{4 \cdot 10^4 s_p^{0,6} s_{np}^{0,2}}{(27 s_p^{0,5} + s_{np}) \sqrt{\lambda\gamma C}} K_D K_Z K_m K_n \times \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2} \sqrt{\frac{mn\gamma C}{28\lambda\sqrt{r_0 s_p}}} \right) \right], \quad (4)$$

где r_0 – радиус основной окружности; x – глубина залегания измененных структур шлифуемой поверхности.

Результаты расчета по выражениям (3, 4) позволяют определить температуры, как на шлифуемой поверхности профиля зубчатого колеса, так и на различных глубинах от нее, что даст возможность определить глубину дефектного слоя (прижогов).

В поверхностных слоях зубчатых колес из закаленной стали в процессе шлифования выше критической точки A_{c3} происходят превращения исходной структуры мартенсита закалки в аустенит. Скорость охлаждения шлифуемой поверхности может достигать до 6000 град/с, что значительно превышает критическую температуру 300 град/с, необходимую для превращения аустенита в мартенсит. В связи с этим после выхода обрабатываемой поверхности из зоны шлифования на ней образуется слой мартенсита вторичной закалки. Поэтому

глубина проникновения температуры фазовых превращений будет определять глубину прижогавторичной закалки. Например, при $t = 0,03$ мм/ход, $n=1200$ об/мин, $s_{np} = 1,5$ мм/об, $m = 3$ мм, $z = 30$, $D = 300$ мм, материал детали 12Х2Н4А, круг Э9А10СМ2К10 получим по выражению (3) максимальную температуру в зоне контакта зубчатого колеса с червячным кругом $Q = 1000^\circ\text{C}$. Согласно экспериментальным исследованиям температура фазовых превращений для стали 12Х2Н4А составляет 800°C , тогда пользуясь выражением (4) можно определить глубину дефектного слоя $= 0,013$ мм, т.е. на этой глубине возникнет прижог вторичной закалки, а при температуре 500°C глубина дефектного слоя будет $0,037$ мм, при этом происходит прижог отпуска.

В результате исследований установлено, что если скорость нагрева поверхностных слоев зубчатого колеса червячным кругом в зависимости от режимов увеличить до $30\,000$ град/с, то критическая точка структурных превращений смещается в сторону меньших значений температур.

При шлифовании профильным кругом колес внутреннего зацепления прижоги появляются на головке зуба, а у колес наружного зацепления – в зоне переходной кривой, что делает зубчатые колеса не пригодными к эксплуатации.

Для снижения вероятности образования прижогов при шлифовании твердой поверхности детали обработку осуществляют мягкими кругами. Тип и размер шлифовального круга выбирают исходя из модели станка и размеров зубчатого колеса. Выбор абразивного материала зависит от материала заготовки [1-7]. Например, при шлифовании сплавов на основе железа и никеля целесообразно использовать электрокорунд белый марки 24А, 25А. Одинаковые температуры в зоне шлифования могут быть получены при использовании тарельчатых кругов типа 14 твердостью R, плоских кругов типа 1 твердостью O – N. В качестве связки рекомендуется керамическая связка, т.к. она хорошо удерживает зерно от вырывания и в то же время позволяет профилировать круг. Возможно применение бакелитовой связки. Основные принципы при выборе зернистости следующие: с увеличением зернистости шероховатость обработанной поверхности увеличивается; а с уменьшением зернистости возрастает вероятность появления шлифовочных прижогов. Необходимо так же учитывать, что с уменьшением модуля зубчатого колеса снижается абсолютная величина допуска, поэтому возрастают требования к износостойкости инструмента. Поскольку при прочих равных условиях размерная стойкость инструмента увеличивается с уменьшением зернистости, то с уменьшением модуля зубчатого колеса желательно использовать круги меньшей зернистости (табл .1).

Табл. 1. Характеристики шлифовальных кругов

Тип круга	Модуль, мм	Характеристики круга		Степень точности
		Зернистость	Степень твердости	
1	0,2 – 0,4	M40	L - O	4, 5
	0,5 – 0,7	F280	K - L	4, 5
	0,8 – 0,9	F220	J - K	3, 4
	1,0 – 1,5	F180	J - K	3, 4
	1,5 – 10	F120, F90 – F46	K – L, J - K	3 – 6
12, 14	1,5 – 12	F90 – F46	J - K	3 – 5

Назначение режимов шлифования начинается со скорости круга 25 – 35 м/с. Первые черновые проходы следует выполнять с наибольшими значениями подачи на глубину и постепенным уменьшением до 0,03 – 0,04 мм. Подача на чистовых проходах снижается до 0,01 – 0,02 мм при шлифовании методом обката и 0,01 – 0,03 мм методом копирования. Подача на глубину при шлифовании методом копирования определяется в радиальном направлении, а при шлифовании методом обката по нормали к профилю зуба. Чем меньше величина параметра шероховатости, тем меньшее значение должно быть подачи. Количество проходов увеличивается с уменьшением модуля и диаметра колеса.

Подбором режимов шлифования и характеристик кругов можно влиять на количество выделяющейся теплоты в зоне контакта. При увеличении скорости шлифовального круга и перемещения детали количество выделившейся теплоты возрастает. Однако если ограничить время действия источника на обрабатываемую поверхность, то происходит снижение температуры шлифования в зоне контакта. Увеличение поперечной подачи и глубины резания приводит к повышению температуры. Но чем выше теплопроводность материала детали и шлифовального круга, тем меньше вероятность возникновения прижога. Применение пористых кругов за счет снижения трения, лучшего размещения отходов шлифования в порах круга и самозатачивания зерен круга приводит к снижению температуры в зоне контакта и безприжоговому состоянию поверхности. Экспериментально установлено, что высокопористые круги рекомендуется применять при шлифовании сталей, содержащих большое количество хрома, ванадия, кобальта.

Большое значение на эффективность процесса шлифования зубчатых колес оказывает правильный выбор смазочно-охлаждающей жидкости СОЖ и способа ее подвода. Установлено, что наилучшие результаты по шероховатости обработанной поверхности на формообразование показывают масляные СОЖ со специальными присадками [1]. Смазочное действие СОЖ при зубошлифовании проявляется в уменьшении работы трения связки, частиц металла и отходов шлифования, налипших на рабочую поверхность шлифовального круга, и в препятствовании засаливанию круга. Для эффективного осуществления этих функций свежая СОЖ должна непрерывно и в большом объеме поступать на рабочую поверхность шлифовального круга и на поверхность шлифуемой детали, создавая на них прочные защитные пленки. Эффективность смазочного действия СОЖ определяется ее физико-химическими свойствами. Наиболее эффективными будут жидкости, обладающие оптимальным сочетанием смазочных свойств и проникающей способности, что обеспечит высокую термомеханическую прочность смазочной пленки и хорошее смачивание поверхности металла и рабочей поверхности шлифовального круга. Например, эмульсол дисульфид молибдена, сульфифрезол, масляные СОЖ с противозадирными присадками животного или растительного происхождения или галоид-серо-фосфоросодержащие присадки марок ИСЭ-25, 20% раствор минерального масла ЛЗ-СОЖ-2МО (зарубежный аналог EnergolGF 55, GFS 80, GrindingOil 40), МР-1у (EnergolCFC, Dortan 37), МР-2у (Dortan 53, MacronOilC),

MP-3 (Mobilmet 25, SchellGariaOilT), MP-8 (Mobilmet 455), MP-99 (Mobilmet 29, Sevora 46), OCM-5 (Dortan 32, Supraco 502, 503, 504).

Таким образом, в работе проведены исследования по шлифованию профиля зуба кругами разных типов с различными способами образования поверхности. Большое значение на эффективность процесса шлифования зубчатых колес оказывает правильный выбор смазочно-охлаждающей жидкости СОЖ и способ ее подвода. Установлено, что наилучшие результаты по снижению шероховатости обработанной поверхности показывают масляные СОЖ со специальными присадками. Даны рекомендации эффективных жидкостей и их иностранных аналогов.

Список литературы

1. Худобин Л.В. Технология машиностроения, станки и инструменты: энциклопедия / под общ. ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение-1, 2006. – Т. 1.
2. Волков Д.И., Коряжкин А.А. Конечно-разностный расчет температуры при шлифовании ленты // Российские инженерные изыскания. 2012. Т. 32, № 3. С. 296-298.
3. Погораздов В.В., Захаров О.В. Геометро-аналитическая поддержка технологий формообразования винтовых поверхностей: учеб. пособие. Саратов: СГТУ, 2004. 72 с
4. Козлов А.М., Малютин Г.Е. Управление процессом чистовой обработки поверхностей сложной формы на фрезерных станках с ЧПУ // Научные технологии в машиностроении. 2018. №14. С. 29-37.
5. Носенко В.А., Носенко С.В. Технология шлифования металлов: монография. Староскол: ТНТ, 2013. 616 с.
6. Артемов И.И., Зверовщиков А.Е., Нестеров С.А. Стратегия оценки технологичности конструкции изделий для высокотехнологичности наукоемких машиностроительных производств // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им П.А. Соловьева. 2017. №1(40). С. 286-290.
7. Иванова Т.Н., Петроков А.Г. Повышение эффективности обработки деталей шлифовальным инструментом с измененной конструкцией режущей поверхности // Естественные и технические науки. – Москва: ООО «Издательство «Спутник+». 2014. Вып. № 7 (74). С. 65-71.

Сведения об авторе:

Иванова Татьяна Николаевна – д.т.н., доцент, профессор ЧВ ПНИПУ, г.Чайковский, Институт механики ФГБУН «Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН», г. Ижевск.