

С. П. Никитин

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ НА СРЕДНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ГЛУБИННОМ ШЛИФОВАНИИ

Представлены результаты теоретического исследования плоского глубинного шлифования с учетом взаимодействия упругих, тепловых и рабочих процессов. Для исследования использована теплодинамическая модель плоскошлифовального станка. Рассмотрено влияние параметров динамической системы станка и процесса глубинного шлифования на средние температуры и точность обработки. *Динамическая система станка; теплодинамика процесса резания; динамические характеристики*

ВВЕДЕНИЕ

Шлифование широко применяется из-за его специфических качеств, которые можно характеризовать высокой точностью и высоким качеством поверхностей детали при обработке закаленных материалов, возможностью использования в качестве процесса конечной обработки. Точность формы поверхности, получаемой при шлифовании, определяется большими скоростями вращения шлифовальных кругов и, вследствие этого, вынужденными колебаниями в динамической системе станка. Качество поверхностного слоя заготовки определяется весьма интенсивными тепловыми процессами при шлифовании, нередко приводящими к прижогам на поверхности.

Глубинное шлифование по сравнению с обычным маятниковым шлифованием отличается лучшим качеством поверхностей, более незначительным влиянием температуры пограничного слоя детали, более высоким собственным напряжением давления, более благоприятным динамическим поведением заготовки, а также незначительным относительным износом инструмента [4–6]. Глубинное шлифование делает возможным экономическое изготовление сложных профилей, которые отличаются большой точностью. Методы глубинного шлифования проводятся с незначительными скоростями резания, которые используются и при маятниковом шлифовании.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Задачей является управление тепловыми и упругими явлениями при глубинном шлифовании так, чтобы обеспечить заданную точность и качество поверхностного слоя заготовки. Для

конечного качества заготовки при шлифовании определяющими являются упругие колебания в станке и следы дробления на заготовке, прижоги и микроструктура поверхностного слоя.

Поэтому при исследовании определяют способы исключения колебаний или понижения их уровня. Задача усложняется тем, что при шлифовании обработка осуществляется геометрически неопределенными лезвиями. Это затрудняет выявление зависимостей между параметрами процесса шлифования и результатами обработки.

Одновременно с этим наблюдается взаимовлияние указанных выше факторов. Так, развивающиеся колебания динамической системы приводят к изменению силы резания и колебанию температуры резания. С другой стороны, тепловые воздействия в зоне резания приводят к разупрочнению обрабатываемого материала и за счет температурных деформаций упругой системы к снижению точности. На рис. 1 представлена схема W. Dietrich [7], которая дает приближенную картину взаимодействия процессов при шлифовании.

К колебательной системе (рис. 1) при плоском шлифовании относится подсистема инструмента, в которую входит шлифовальный круг с приводом, подсистема заготовки и упругая система станка. На склонность к колебаниям и вибрациям влияют характеристики шлифовального круга, его профиль, а также кинематика процесса. Заготовка через свою геометрию, статическую и динамическую жесткости также влияет на процесс колебаний.

Станок, большей частью, представляет собой сложную структуру и через статические и динамические свойства, а точнее, через передаточные функции процесса шлифования, оказывает значительное влияние на колебания при шлифовании.

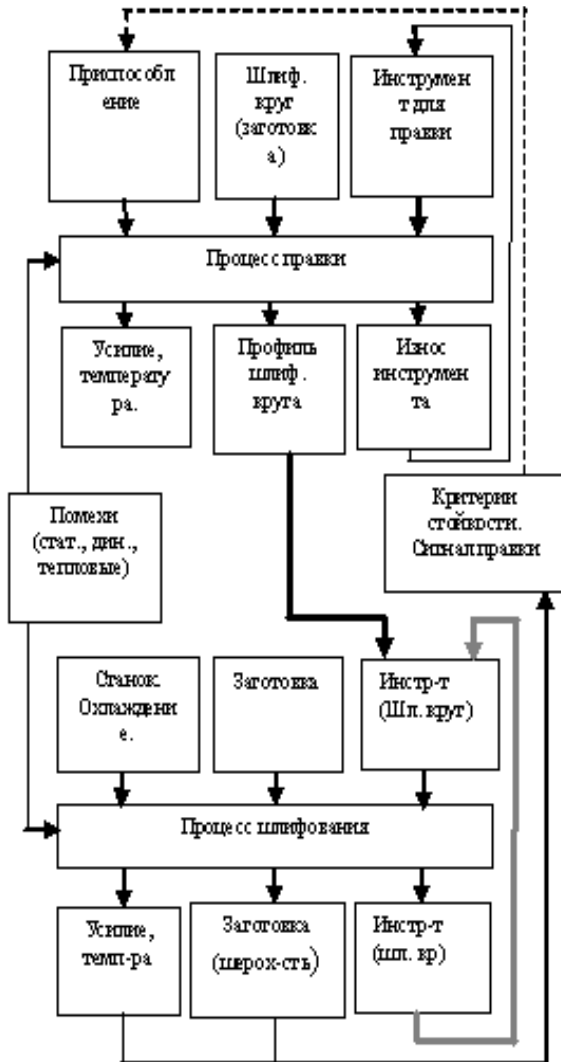


Рис. 1. Динамическая система станок-заготовка-инструмент с процессом шлифования и правки

До настоящего времени тепловые и динамические процессы при шлифовальной обработке исследовались раздельно. Для определения динамических свойств станков как сложных структур существуют хорошо разработанные методы анализа. В частности, экспериментальный модальный анализ позволяет определить формы колебаний динамической системы станка и выявить слабые элементы конструкции.

Но при использовании предельных режимов резания и повышении требований к точности обработки постоянные времени этих процессов в зоне резания становятся сравнимыми. Поэтому динамическое поведение технологического оборудования можно предсказать только с учетом комплексного воздействия тепловых и упругих процессов.

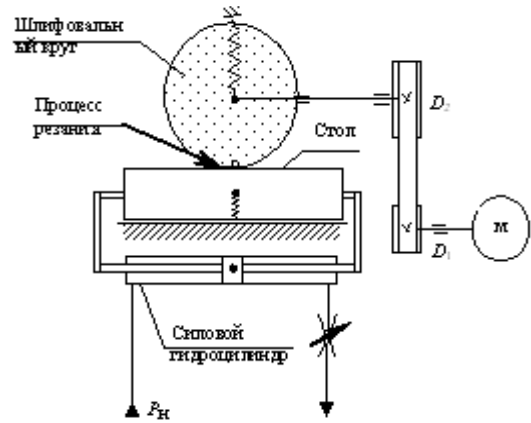


Рис. 2. Расчетная схема плоскошлифовального станка

В рамках решения задачи управления тепловыми и упругими явлениями при шлифовании были проведены исследования влияния конструктивных параметров и режимов резания на уровень температур и колебаний при плоском глубинном шлифовании. Для исследований в данной работе использована математическая модель теплодинамической системы шлифовального станка [1], учитывающая взаимодействие упругих, тепловых явлений и процесса резания:

$$M_z \ddot{z} + h_z \dot{\varphi} + C_z + k_z P = 0,$$

$$M_x \ddot{x} + h_x \dot{x} + C_x x + k_x P = 0,$$

$$M_y \ddot{y} + h_y \dot{y} + C_y y + k_y P = 0,$$

$$h_{px} \dot{x} + h_{py} \dot{y} + k_{py} y + h_{pz} \dot{z} + k_{pz} z + \frac{1}{T_p} P + P = 0,$$

$$C_c \frac{d\Theta_1}{dt} + \left(\frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_{\Gamma\Pi}}\right)\Theta_1 - \frac{1}{R_{\Gamma\Pi}}\Theta_2 = Q_d b^*$$

$$-\frac{1}{R_{\Gamma\Pi}}\Theta_1 + \left(\frac{1}{R_{\Gamma\Pi}} + \frac{1}{R_z}\right)\Theta_2 - \frac{1}{R_z}\Theta_3 = Q_{\Gamma\Pi}$$

$$-\frac{1}{R_z}\Theta_2 + C_k \frac{d\Theta_3}{dt} + \left(\frac{1}{R_k} + \frac{1}{R_y} + \frac{1}{R_z}\right)\Theta_3 - \frac{1}{R_y}\Theta_4 = 0$$

$$-\frac{1}{R_y}\Theta_3 + \left(\frac{1}{R_y} + \frac{1}{R_{\Gamma3}}\right)\Theta_4 - \frac{1}{R_{\Gamma3}}\Theta_5 = Q_{\Gamma3}$$

$$-\frac{1}{R_{\Gamma3}}\Theta_4 + C_{\text{и}} \frac{d\Theta_5}{dt} + \left(\frac{1}{R_{\Gamma3}} + \frac{1}{R_{\text{и}}}\right)\Theta_5 = Q_d (1-b^*),$$

где $\Theta_{1,2,3,4,5}$ – средние температуры характерных элементов исходной системы шлифовальной обработки соответственно: средняя температура стружки; средняя температура на передней поверхности зерна (температурой резания); средняя температура в теле режущего зерна; средняя температура на задней поверхности

зерна; средняя температура изделия; x, y, z – обобщенные координаты механической подсистемы; k_{Px}, k_{Py} – коэффициенты резания по соответствующим координатам; h_{Px}, h_{Py}, h_{Pz} – коэффициенты демпфирования резания по соответствующим координатам; h_x, h_y, h_z – коэффициенты эквивалентных сопротивлений движению механической подсистемы по соответствующим осям; k_x, k_y, k_z – коэффициенты, определяемые проекциями силы резания на соответствующие оси; M_z, M_y, M_x – приведенные массы подвижных частей механической подсистемы; Q_d – теплота деформации (в ваттах); b^* – коэффициент распределения теплоты деформации между изделием и стружкой; $Q_{тп}$ – источник теплоты трения стружки по передней поверхности; $Q_{тз}$ – источник теплоты трения заготовки по задней поверхности; $R_{тп}$ – определяет теплообмен между стружкой и передней поверхностью зерна; $R_{тз}$ – аналогично, определяет теплообмен между изделием и задней поверхностью зерна; R_c – отражает отвод тепла со стружкой из зоны резания; R_n – учитывает теплоотвод из зоны резания в глубину изделия за счет его относительного движения; R_z, R_y – отражают теплообмен между задней и передней поверхностями зерна; R_k – учитывает отвод тепла от зерна в связку круга; $C_{и}, C_{к}, C_{с}$ – учитывают теплоемкость участков тепловой модели; C_x, C_y, C_z – эквивалентные жесткости механической подсистемы по соответствующим осям.

Для построения математической модели использован метод электрической аналогии, который позволяет отразить как тепловые, механические, так и процессы другой физической природы.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

За счет развития глубинного шлифования и расширения областей его применения сегодня отчасти могут заменяться обычные процессы обработки, такие как профильное фрезерование и точение [4]. Большие контактные длины, более высокое преобразование общей энергии и более высокие силы шлифования создавали широко распространенное представление, что при глубинном шлифовании могут возникать тепловые повреждения поверхности детали и краевой зоны детали [3–5]. Научными исследованиями были указаны технологические зависимости и, вместе с тем, объяснены преимущества глубинного шлифования по сравнению с обычным маятниковым шлифованием. В частности, важное знание, что вновь обработанная

поверхность при глубинном шлифовании во время процесса съема получает значительно меньшие тепловые напряжения, чем это случается при маятниковом шлифовании, содействовало широкому применению метода глубинного шлифования [3–5].

Исследование глубинного шлифования в области повышенных норм съема происходило при внедрении новых станков и шлифовальных инструментов и применении в связи с этим более высоких скоростей шлифовальных инструментов. При этом полученные сведения сделали возможным при реализации автоматизированных рабочих процессов применять эффективные станки с современными системами управления ЧПУ. Совершенствование методов глубинного шлифования в сторону большей объемной производительности привело к появлению высокопроизводительного шлифования. Тем не менее, из-за высокой контактной температуры в зоне резания многие потенциальные пользователи не применяют использования высокопроизводительное шлифование.

Слишком высокие температуры в краевой зоне детали нежелательны из-за возможных повреждений детали.

Повышенные температуры, как в контактной зоне, так и в краевой зоне, как это установлено в многочисленных работах [2–6], вызывают повышение скорости резания. На рис. 3 представлена зависимость средней температуры характерных точек зоны резания от скорости резания при шлифовании. Здесь ряд 1 показывает изменение экспериментальной температуры, полученной с помощью закладной полуйскусственной термодопы [2]. Ряды 2, 3, 4, 5, 6 показывают изменения средних температур, полученных по модели (расчетным путем). Ряд 2 показывает температуру в зоне резания (стружки), ряд 3 показывает среднюю температуру на поверхности передней поверхности зерен шлифовального круга (температура резания), ряд 4 показывает изменение средних температур в зерне, ряд 5 показывает среднюю температуру на задней поверхности зерна, ряд 6 демонстрирует изменение температуры на поверхности заготовки.

Исходя из этого, повышение скорости резания допустимо только до предельного значения, при котором еще не возникает повреждения детали.

На температуру в контактной зоне оказывает влияние также величина глубины резания, и, как следствие, контактная длина, кинемати-

ческое число лезвий, шлифовальные силы и качество поверхностей [2–6]. На рис. 4 представлено изменение средних температур в зависимости от глубины резания при постоянной объемной производительности шлифования и отсутствии охлаждения.

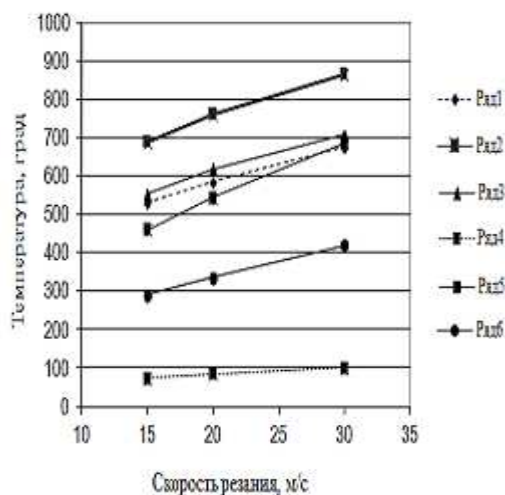


Рис. 3. Влияние скорости резания на температуру при шлифовании

Здесь ряды 1, 2, 3, 4, 5 показывают изменения средних температур, полученных по модели (расчетным путем). Ряд 1 показывает температуру в зоне резания (стружки), ряд 2 показывает среднюю температуру на передней поверхности зерен шлифовального круга (температура резания), ряд 3 показывает изменение средних температур в зерне, ряд 4 показывает среднюю температуру на задней поверхности зерна, ряд 5 демонстрирует изменение средней температуры на поверхности заготовки.

Левая область кривой (ряд 5) характерна для маятникового шлифования. Температура краевых зон детали растет с возрастанием глубины резания, а также с увеличением длительности воздействия из-за незначительной скорости заготовки [3–6]. Известно, что для обычного шлифования температура поверхности заготовки непрерывно повышается с увеличением глубины резания.

По отношению к глубинному шлифованию переход в область большей глубины резания и меньших скоростей должен был означать, прежде всего, дальнейшее повышение температуры поверхности детали.

Однако исследования (рис. 4, ряд 5) показали, что с определенной глубины резания при постоянной объемной производительности тенденция изменения температуры поверхностей

меняется. При глубинном шлифовании (правая часть кривой) температура на поверхности детали снижается с ростом глубины резания.

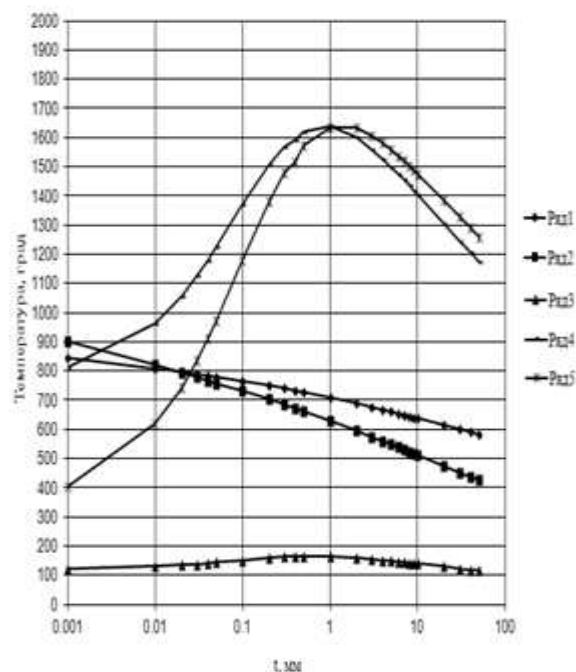


Рис. 4. Зависимость температуры от глубины резания при глубинном шлифовании

Это можно объяснить тем, что при постоянной скорости продольной подачи и постоянной скорости резания, объемная производительность шлифования с увеличением глубины резания повышается. При этом образуется больший энергетический поток, который ведет к более высоким контактным температурам зон. Если объемная производительность шлифования поддерживается постоянной так, что при растущей глубине резания скорость заготовки соответствующим образом сокращается, температура краевых зон вначале возрастает и достигает при определенной глубине резания максимальной величины. А при дальнейшем повышении глубины резания температура снова снижается [4–6].

Теоретические значения средней температуры на поверхности заготовки, полученные по модели, оказываются слишком большими в экстремальной точке. Это делает невозможным использование процесса глубинного шлифования без смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС). Использование СОТС меняет картину (рис. 5). Пиковые значения средних температур значительно снижаются.

СОТС выполняет следующие роли при шлифовании: смазывание, охлаждение, отвод стружки, очистку шлифовального круга.

При смазывании сокращаются трение и контактные силы в зоне резания, так что энергетический поток уменьшается. При охлаждении часть энергии, которая ведет к нагреванию детали, отводится СОТС во внешнюю среду. Возникающая при шлифовании стружка выводится СОТС из рабочей зоны. Если частицы материала осаждаются на поверхности шлифовального круга, то это мешает процессу шлифования. Их закрепление может предотвращать обильное орошение шлифовального круга СОТС под высоким давлением.

При теоретическом исследовании можно отдельно рассмотреть влияние этих факторов на среднюю температуру поверхности заготовки. Как показывает численный эксперимент (рис. 6), наибольшее значение на снижение пиковых средних температур поверхности заготовки оказывает смазывающее воздействие СОТС, поскольку отвод тепла с СОТС из зоны резания затруднен.

Ряд 2 получен при условии, что тепло из зоны резания зерен уносится СОТС, которая размещается в порах шлифовального круга [2]. Поскольку этот объем пор сравнительно не велик, то эффект от отвода тепла из зоны резания зерен в этот объем СОТС оказывается несущественным.

Ряд 3 построен, исходя из того, что из-за смазывающей роли СОТС коэффициент трения заготовки и зерен по задней поверхности снижается. Это ведет к снижению теплоты трения и существенному снижению средней температуры на поверхности заготовки при глубинном шлифовании. Это совпадает с известными данными [3, 7]. Поэтому при глубинном плоском шлифовании требуется реализация эффективного смазывающего действия СОТС, чтобы снизить энергетический уровень и уровень температуры на поверхности заготовки. Вследствие этого охлаждающий эффект становится менее важным; так как тепло, которое вовсе не возникает, не нужно отводить. В этом отношении при глубинном шлифовании более подходят СОТС на основе масел.

Причинами роста температуры при маятниковом шлифовании и спада температуры при глубинном шлифовании являются контактные условия между шлифовальным инструментом и деталью. Они в корне различны при упомянутых методах шлифования. При глубинном шли-

фовании длина контакта составляет от 20 до 60 мм. Установленные скорости детали меньше, чем 10 мм/с. При маятниковом шлифовании контактная длина составляет от 0,2 до 2 мм и скорость заготовки 50–500 мм/с. При этом время теплового воздействия при глубинном шлифовании от 250 до 1000 раз дольше, чем при маятниковом шлифовании. Однако одновременный поток тепла через поверхность заготовки уменьшен, так как при глубинном шлифовании больший объем теплоты втекает в поверхность заготовки за значительно более длинный период времени. Это вызывает менее высокую температуру краевых зон [4].

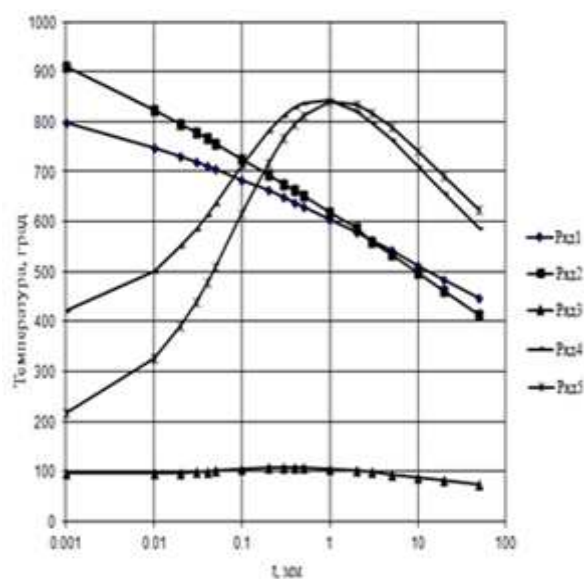


Рис. 5. Зависимость температуры от глубины резания при глубинном шлифовании с СОТС

Следует отметить снижение теоретических средних температур стружки и средних температур на передней поверхности зерен с возрастанием глубины резания (рис. 5, 6). Это можно объяснить снижением величины скорости заготовки при сохранении постоянной объемной производительности шлифования, что ведет к уменьшению удельной производительности [2]. Это вызывает снижение теплового потока от энергии разрушения материала и соответствующих температур.

Совокупная сила резания при возрастании глубины резания возрастает (рис. 7), что вызывает отжатие упругой системы станка, относительное смещение круга и заготовки и вследствие этого некоторое уменьшение заданной глубины резания.

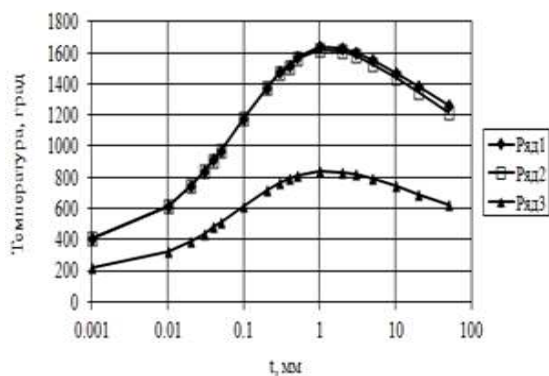


Рис. 6. Снижение температуры заготовки при глубинном шлифовании от глубины резания: 1 – без СОТС; 2 – с СОТС на основе водной эмульсии; 3 – с СОТС на основе масел

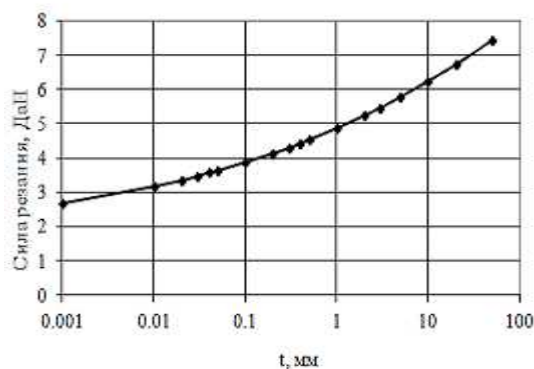


Рис. 7. Зависимость силы резания от глубины резания при глубинном шлифовании с СОТС

Одной из причин повышения средней температуры на поверхности заготовки при возрастании глубины резания является увеличение силы трения по задней поверхности зерен. Сила трения создает дополнительный источник тепла и, следовательно, обуславливает возрастание средних температур в этой зоне.

Известно, что повышение скорости заготовки при постоянной глубине и скорости резания уменьшает температуру во вновь обработанной поверхности детали [6]. Влияние скорости заготовки при одинаковой объемной производительности шлифования на температуру поверхностей (ряд 1, б) при плоском глубинном шлифовании показано на рис. 8. Здесь ряд 1 показывает изменение экспериментальной температуры, полученной с помощью закладной полусинтетической термпары [2]. Ряды 2, 3, 4, 5, 6 показывают изменения средних температур, полученных по модели (расчетным путем). Ряд 2 показывает температуру в зоне резания (струж-

ки), ряд 3 показывает среднюю температуру на поверхности передней поверхности зерен шлифовального круга (температура резания), ряд 4 показывает изменение средних температур в зерне, ряд 5 показывает среднюю температуру на задней поверхности зерна, ряд 6 демонстрирует изменение температуры на поверхности заготовки.

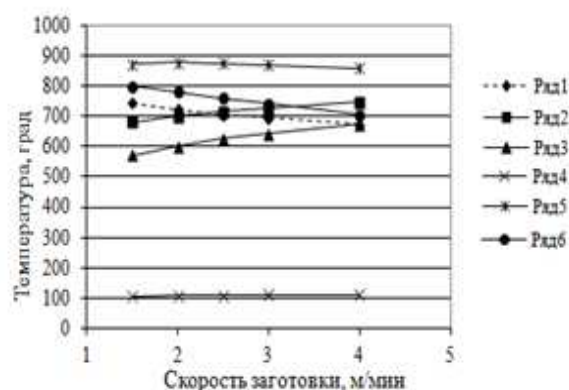


Рис. 8. Влияние скорости заготовки на температуру при шлифовании

Однако преимущества снижения температуры поверхностей детали при повышении скорости заготовки не могут быть использованы в полной мере при глубинном шлифовании, они реализуются только при высокопроизводительном шлифовании с высокой скоростью детали.

ВЫВОДЫ

Глубинное шлифование благодаря высокой величине съема позволяет обрабатывать пазы профили глубиной в несколько миллиметров за проход с высокой точностью и малой шероховатостью обработанных поверхностей. При этом возникают большие энергетические потоки, которые могут значительно повлиять на качество обработки.

Предложена математическая модель и методика оценки динамики процесса глубинного шлифования, позволяющая прогнозировать средние температуры при обработке. С помощью математической модели получены закономерности изменения средних температур в зоне резания при глубинном шлифовании в зависимости от скорости резания, глубины резания и скорости заготовки.

При глубинном шлифовании зависимость средней температуры поверхности заготовки от глубины резания представляет собой экстремальную кривую. Характер зависимости и ве-

личина экстремальной температуры определяются параметрами динамической системы станка и режимами резания. Глубинное шлифование возможно только при использовании смазочно-охлаждающей технологической среды, имеющей повышенные смазочные свойства.

Результаты работы позволяют разрабатывать технологию глубинного шлифования, обеспечивающую приемлемую температуру на поверхности заготовки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Никитин С. П.** Моделирование процесса резания при шлифовании с учетом взаимодействия упругой и тепловой систем // Вестник УГАТУ. 2009. Т. 12, № 4(33). С. 61–65.
2. **Резников А. Н., Резников Л. А.** Тепловые процессы в технологических системах: учеб. М.: Машиностроение, 1990. 288 с.
3. **Якимов А. В., Слободяник П. Т., Усов А. В.** Теплофизика механической обработки: учеб. пособие. Одесса: Лыбидь, 1991. 240 с.

4. **Werner G.** Realisierung niedriger werkstückoberflächen temperaturen durch den einsatz des tief-schleifens; trenn-kompodium, Bd. 2, S. 448 / 468, ETF-Verlag, Bergisch-Gladbach, 1983.

5. **Löwin R.** Schleiftemperaturen und ihre auswirkungen im werkstück; dissertation, RWTH Aachen, 1980.

6. **Tawakoli T.** hochleistungsflachschleifen-technologie, verfahrensplanung und wirtschaftlicher einsatz. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1988.

7. **Dietrich W.** Analyse selbsterregter schwingungen beim aussenrund-einsteichschleifen.dissertation, Technischen Universität Braunschweig, 1984.

ОБ АВТОРЕ

Никитин Сергей Петрович доц. каф. металлорежущих станков и инструментов Пермск. гос. техн. ун-та. Канд. техн. наук по процессам механической и физико-технической обработки, станкам и инструментам. Иссл. в обл. динамического качества технологических машин.