

УДК 621.9.079.6:621.892

DOI: 10.30987/article_5b0e4112149753.47733370

**С.И. Агапов, д.т.н.,
Ю.И. Сидякин, д.т.н.,
О.Ф. Корпелянский, аспирант**
(Волгоградский государственный технический университет,
400050 г. Волгоград, пр. им. В.И. Ленина, 28)
E-mail: techmach@vstu.ru

Повышение точности отверстий при развертывании в деталях из труднообрабатываемых материалов

Приведены результаты исследования характера влияния геометрии инструмента на точность обрабатываемых отверстий в деталях из труднообрабатываемых материалов при введении в зону резания ультразвуковых колебаний. Рассмотрены процессы развертывания отверстий в деталях из нержавеющей стали и титановых сплавов при наложении ультразвуковых колебаний на инструмент. Установлены основные параметры инструмента, определяющие точность получаемых отверстий. Выявлены закономерности влияния передних и задних углов режущих лезвий развертки, угла заборного конуса и направления спирали инструмента на разбивку отверстий.

Ключевые слова: развертывание; геометрия разверток; точность отверстий; ультразвуковые колебания; труднообрабатываемые материалы.

**S.I. Agapov, D. Eng.,
Yu.I. Sidyakin, D.Eng.,
O.F. Korpelyansky, Post graduate student**
(Volgograd State Technical University, 28, Lenin Avenue, Volgograd 400050)

Hole accuracy increase at hole reaming in hard-to-machine parts

The investigation results of the tool geometry impact upon accuracy of holes worked in hard-to-machine parts at the ultrasonic oscillation introduction in a cutting area are shown. The processes of hole reaming in parts made of stainless steel and titanium alloys at ultrasonic oscillation application upon a tool are considered. Tool basic parameters defining the accuracy of holes obtained are defined. The regularities of the impact of face and back angles of reamer cutting ends, an angle of an intake cone and a tool spiral direction upon a hole smash are revealed.

Keywords: reaming; reamer geometry; hole accuracy; ultra-sonic oscillations; hard-to-machine materials.

В настоящее время резко расширен выпуск различных изделий общего и специального назначения, в том числе газовых турбин, реактивных двигателей и других изделий, в которых применяются детали из весьма труднообрабатываемых высокопрочных и жаростойких сталей и титановых сплавов. Из практики хорошо известно, что получение требуемой микро- и макрогеометрии поверхности является одним из наиболее важных вопросов при обработке изделий. Особое значение этот вопрос приобретает в условиях необходимости улучшения эксплуатационных свойств машин

и механизмов, повышения их надежности и долговечности.

Работами многих исследователей [3, 5, 7, 8] установлено, что поверхность с меньшей шероховатостью не во всех случаях является оптимальной с точки зрения прирабатываемости и износостойкости деталей в первый период работы. Для различных условий изнашивания необходимо находить оптимальную допустимую шероховатость поверхности. В этой связи управление процессом обработки отверстий при наложении вынужденных ультразвуковых колебаний (УЗК) на инструмент представляет

определенный интерес.

Процесс развертывания должен обеспечить получение отверстий в пределах Н6 – Н7 с геометрическими отклонениями (овальность, конусность, волнистость), не выходящими из поля допуска. Точность обработанного отверстия в значительной мере определяется калибрующей частью развертки [1, 2]. Однако результаты практики показывают, что диаметр полученного отверстия не всегда совпадает с диаметром развертки. Чаще всего наблюдается разбивка, т.е. диаметр обработанного отверстия становится больше диаметра развертки. Гораздо реже встречается усадка – уменьшение диаметра развернутого отверстия по сравнению с диаметром инструмента. Нахождение научно-прикладных путей управления значениями разбивка-усадка позволяет с большой надежностью получать точные и стабильные по размерам отверстия в производстве при обработке труднообрабатываемых материалов.

Факторы, влияющие на значения разбивка-усадка условно можно подразделить на две группы. Первая группа – это внешние факторы, не зависящие от процесса резания, к ним относятся погрешность закрепления и изготовления инструмента, биение шпинделя и т.д. Вторая группа – это внутренние факторы, связанные с процессом резания. К ним относятся деформация развертки и изделия, нарост на режущих и калибрующих зубьях.

Наиболее существенное влияние из факторов второй группы на точность обработанных отверстий оказывают вибрации системы ТС.

В результате наложения ультразвуковых колебаний (УЗК) на режущий инструмент изменяется принципиальная схема резания. Кинематическое соотношение (инструмент – изделие) порождает новый характер траектории и величины скорости относительного рабочего движения инструмента.

При ультразвуковом развертывании станок сообщает детали или инструменту в процессе резания два простых движения – вращательное и прямолинейное. Кроме этих движений ультразвуковой блок сообщает развертке комплексные колебательные движения: возвратно-вращательное (крутильные УЗК) и возвратно-поступательное движение (УЗК колебания), таким образом, имеется сочетание четырех простых движений:

- 1) вращательное движение инструмента или детали;
- 2) поступательное движение детали или инструмента;

- 3) крутильные ультразвуковые колебания инструмента;

- 4) осевые ультразвуковые колебания.

Необходимо определить параметры развертывания, при которых передние и задние углы будут мало отличаться от некоторых технологически обусловленных значений, оставаясь в заданных узких границах.

При развертывании отверстий следы вибраций наблюдаются в основном на входе. На основании наблюдений и литературных материалов [2–5] можно предположить, что вибрации при развертывании относятся к автоколебательному процессу. При этом вибрации возникают и поддерживаются в системе «шпиндель – развертка – деталь», причем с увеличением скорости резания, подачи и глубины резания интенсивность и амплитуда вибраций возрастают, что сказывается на производительности труда.

Вибрации в процессе развертывания отверстий возникают в результате имеющихся нелинейных связей в зоне резания между деталью и инструментом. Здесь следует выделить два принципиально различных класса автоколебаний:

– первый класс, который характеризуется наличием ограничения в линейной связи между силами, возникающими из-за предельного отжима зубьев развертки от влияния неуравновешенных радиальных сил в процессе резания от положения равновесия. А.И. Марковым впервые обнаружен эффект гашения вибраций при положении УЗК [8];

– второй класс автоколебаний характеризуется наличием нелинейных связей петлевого типа, влияния неустойчивости нароста, нелинейности типа сухого трения, нелинейной зависимости сил резания при врезании и оттачивании режущей кромки и т.д.

Значительное влияние на вид нелинейных связей в процессе резания оказывают вынужденные УЗК. Введение в зону резания УЗК является одним из принципиально новых способов повышения динамической устойчивости системы ТС.

В работе Б.А. Кравченко [7] показано, что силы резания, возникающие в процессе обработки с наложением УЗК на инструмент амплитудой 4...6 мкм, уменьшаются в 2 – 4 раза. При развертывании осевые усилия снижаются на 60...70 %, а крутящий момент – на 45...55 %, что во многом объясняется снижением сил трения при резании с ультразвуковыми колебаниями. В большинстве случаев это устраняет первопричины возникновения автоко-

лебаний и, как подтверждается опытной проверкой [3], значительно повышает динамическую устойчивость системы.

Для рекомендаций при практическом внедрении в производство необходимо знать, как влияют изменения передних и задних углов, угла заборного конуса, направления спирали и разбивки шага зубьев развертки на точность обработки отверстий в труднообрабатываемых материалах.

Рассмотрим влияние указанных углов инструмента на точность отверстий. Исследования проводились развертками Ø 9,996 мм с материалом режущей части Р6М5, геометрия по ГОСТ 7722–77, на режимах: $v = 1$ м/мин; $S = 0,1$ мм/об; $t = 0,05$ мм; охлаждение 10 %-ная эмульсия; амплитуда ультразвуковых колебаний $\xi = 4 \dots 6$ мкм.

При обработке нержавеющей стали и титановых сплавов рекомендации по выбору переднего угла носят двойственный характер. Чем больше передний угол, тем меньше деформация срезаемого слоя, нормальная сила на передней поверхности, температура на поверхностях контакта, упругая деформация поверхности среза и искажения профиля неровности, что должно привести к уменьшению разбивки полученных отверстий.

С другой стороны уменьшение переднего угла приводит к увеличению прочности зуба, что особенно важно при применении твердосплавного инструмента, облегчению процесса стружколомания и отвода стружки из зоны резания. Для определения факторов, играющих значительную роль в процессе развертывания, были проведены эксперименты при обработке нержавеющей стали 12Х18Н10Т и титанового сплава ВТ-20.

Результаты этих исследований представлены на рис.1. Анализ кривых, приведенных на рисунках, показывает, что оптимальным передним углом является $\gamma = 0$, как для традиционной обработки, так и для ультразвуковой. Наложение УЗК на инструмент при обработке 12Х18Н10Т снижает разбивку отверстий с 10,008 до 9,995 мм, а при обработке ВТ-20 – с 10,011 до 9,997 мм (при диаметре развертки 9,996 мм).

Отклонение диаметров отверстий минимально при $\gamma = 0$, при отклонении переднего угла в область отрицательных и положительных значений разбивка возрастает, так при изменении переднего угла от 0 до 15° разбивка возрастает для стали 12Х18Н10Т на 0,004...0,005 мм, а для ВТ-20 – на 0,007...0,008 мм.

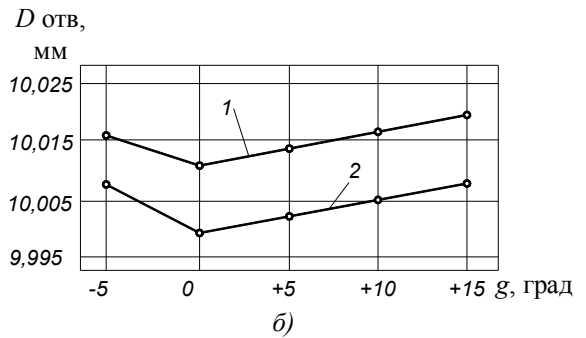
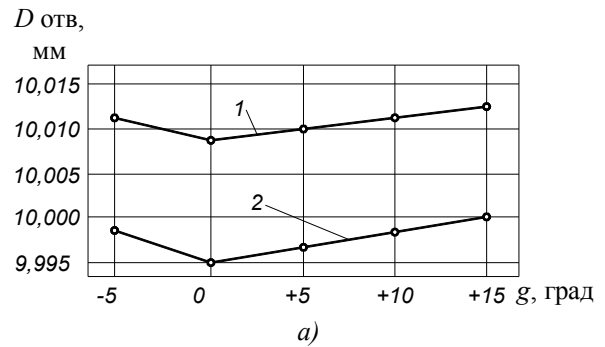


Рис. 1. Зависимость диаметра отверстия от переднего угла развертки:

а – нержавеющая сталь 12Х18Н10Т; б – титановый сплав ВТ-20; 1 – без УЗК; 2 – с УЗК

Зависимость разбивки отверстий от изменения заднего угла в интервале от 6 до 12° при обработке 12Х18Н10Т и ВТ-20 представлены на рис. 2.

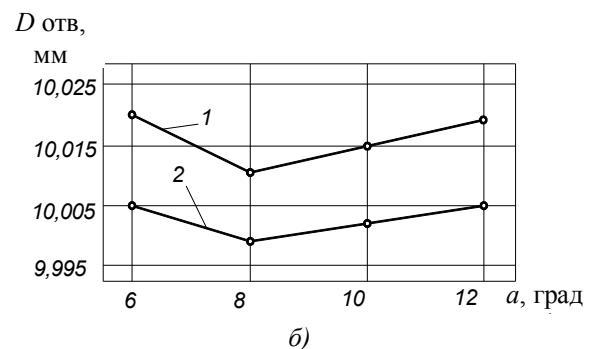
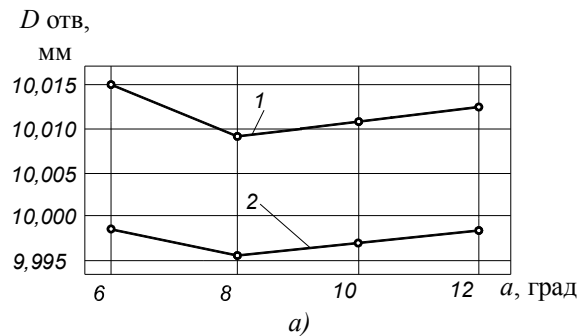


Рис. 2. Зависимость диаметра отверстия от заднего угла развертки:

а – нержавеющая сталь 12Х18Н10Т; б – титановый сплав ВТ-20; 1 – без УЗК; 2 – с УЗК

Влияние заднего угла на точность полученных отверстий более значительно, чем влияние переднего угла [1, 3]. Как видно из рисунков, характер изменения разбивки при обработке 12X18H10T и BT-20 одинаков. Максимальная разбивка получается при заднем угле 6° , так как при малых углах быстро образуется значительная площадка износа по задней поверхности, что приводит к увеличению диаметра отверстия. Наложение УЗК на развертку значительно снижает разбивку, так при обработке стали 12X18H10T она уменьшается на $0,014 \dots 0,015$ мм, а при обработке BT-20 – на $0,015 \dots 0,013$ мм.

Угол заборного конуса также оказывает влияние на разбивку отверстий. Биение заборного конуса приводит к скоплению и забиванию канавок инструмента стружкой, что нередко служит причиной увеличения диаметра, а иногда и поломки инструмента [3]. Зависимость разбивки отверстий от изменения угла заборного конуса ($^\circ$) при обработке 12X18H10T и BT-20 представлены на рис. 3.

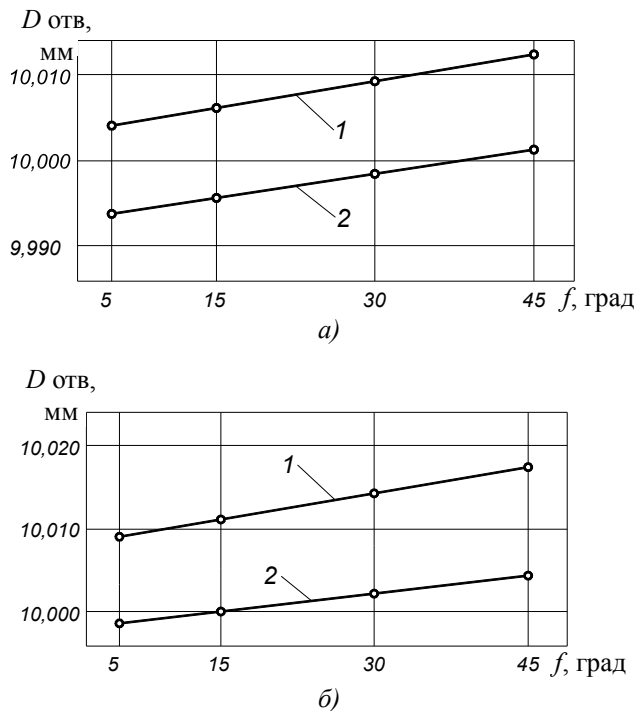


Рис. 3. Зависимость диаметра отверстия от угла заборного конуса развертки:
 а – нержавеющая сталь 12X18H10T; б – титановый сплав BT-20; 1 – без УЗК; 2 – с УЗК

Увеличение угла заборного конуса с 5 до 45° (см. рис.3) приводит к увеличению разбивки отверстий, при традиционной обработке 12X18H10T с $10,004$ до $10,011$ мм, а при наложении УЗК – с $9,994$ до $10,001$ мм при

диаметре развертки $9,996$ мм. Для отверстий в деталях из титанового сплава эти значения соответственно равны $10,007$ и $10,016$ мм, $9,998$ и $10,004$ мм. Как видно из приведенных данных, введение в зону резания УЗК уменьшает разбивку на $0,006 \dots 0,011$ мм.

Для определения оптимальной геометрии инструмента необходимо иметь данные о влиянии разбивки шага зубьев развертки на точность обработки отверстий. Одновременно с числом зубьев режущей части развертки на ее работу оказывает влияние и взаимное расположение зубьев по окружности. В практике обработки отверстий из труднообрабатываемых материалов широкое распространение получили развертки с неравномерным расположением зубьев. Разница в центральном угле между соседними зубьями в стандартных развертках колеблется в пределах $0,5 \dots 5^\circ$ (большие значения для малых чисел зубьев).

В ряде конструкций нестандартных разверток, а также конструкций разверток некоторых зарубежных фирм эта разница достигает 30° [6]. Неравномерное расположение зубьев осуществляется таким образом, чтобы угловые шаги диаметрально противоположных зубьев были равны, т.е. вершины диаметрально противоположных зубьев лежали на одном диаметре. Неравномерное расположение зубьев по окружности в ряде случаев способствует повышению точности развертывания, получению отверстий правильной (без огранки) геометрической формы, повышению качества обработанной поверхности.

Вместе с тем, во многих случаях неравномерное расположение зубьев не дает какого-либо заметного эффекта, а удорожание разверток за счет неравномерного расположения зубьев и усложнение при этом технологии изготовления, а также переточки, не может быть оправдано, поэтому были проведены исследования. При обработке нержавеющей стали 12X18H10T на развертку накладывались комплексные УЗК, а при обработке титанового сплава BT-20 – осевые. Полученные результаты приведены в табл.1.

Как видно из приведенных данных, при обработке отверстий в деталях из нержавеющей стали 12X18H10T лучшие результаты получены при применении разверток с равномерной разбивкой шага зубьев, а при обработке отверстий в деталях из BT-20 – разверток с неравномерной разбивкой шага зубьев. Эти результаты можно объяснить, исходя из того, что титановые сплавы характеризуются малой пластичностью и низкой теплопроводностью.

1. Влияние УЗК и разбивки шага зубьев развертки на точность обработанных отверстий

Обрабатываемый материал	Направление УЗК	Разбивка зубьев	Диаметр отверстия, мм
12X18H10T	комплексные	равномерная	9,995... 9,998
	без УЗК		10,008... 10,012
BT-20	осевые		10,000... 9,998
	без УЗК		10,011... 10,009

На точность обработанных отверстий оказывает влияние направление и величина винтовой канавки. Для определения влияния направления винтовой канавки были проведены работы при обработке деталей из нержавеющей стали 12X18H10T и титанового сплава BT-20. Результаты этих опытов представлены на рис. 4.

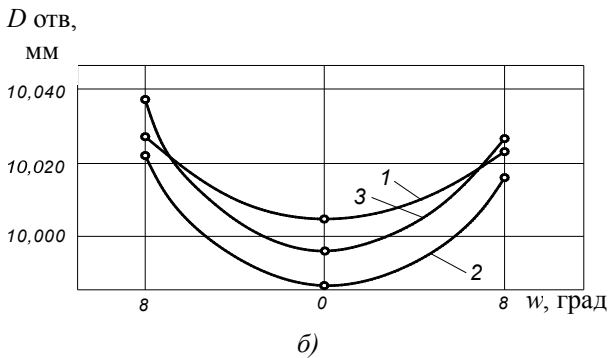
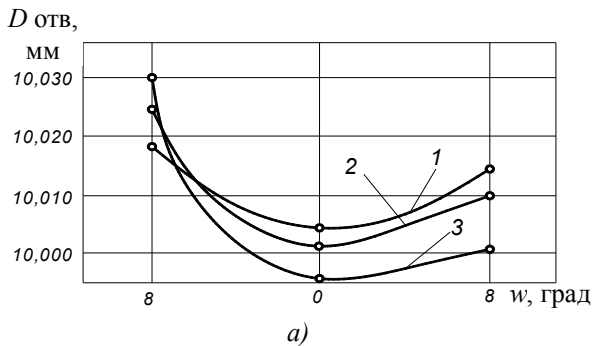


Рис. 4. Зависимость диаметра отверстия от направления винтовой канавки развертки:
а – нержавеющая сталь 12X18H10T; *б* – титановый сплав BT-20; 1 – без УЗК; 2 – комплексные УЗК; 3 – осевые УЗК

Анализ данных, приведенных на рис. 4, показывает, что при использовании разверток с прямым зубом с наложением на инструмент как комплексных, так и осевых УЗК точность отверстий возрастает. Это можно объяснить следующим образом. Применение разверток с прямым зубом приводит к удовлетворитель-

ному отводу стружки из зоны резания, поэтому она не попадает под заднюю поверхность зуба развертки.

При обработке отверстий с применением разверток с винтовыми канавками мельчайшая металлическая пыль, образующаяся в процессе ультразвукового резания и попадающая под зуб приводит к «доводке» отверстия. В результате этого шероховатость поверхности уменьшается, а разбивка возрастает.

На основании приведенных данных можно сформулировать некоторые рекомендации по выбору оптимальных углов при ультразвуковом развертывании, а именно: передний угол должен быть в пределах 0...+5°, задний угол – 8...10°, угол заборного конуса 5...15°, разбивка шага зубьев равномерная при обработке нержавеющей стали 12X18H10T и неравномерная для титанового сплава BT-20.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агапов, С.И. Интенсификация процесса обработки труднообрабатываемых материалов при введении ультразвуковых колебаний в зону резания: монография. – Волгоград: ВолгГТУ, 2009. – 78 с.
2. Агапов, С.И., Головкин, В.В. Повышение эффективности механической обработки путем применения ультразвука: монография. – Самара: Изд-во СНЦ, 2010. – 134 с.
3. Агапов, С.И., Корпелянский, О.Ф. Обеспечение параметров шероховатости поверхности при ультразвуковом резании // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2007. – Вып. 3. – С. 9–15.
4. Бржозовский, Б.М., Бекренев, Н.В. Ультразвуковые технологические процессы и оборудование в машино- и приборостроении: учеб. пособ. – Саратов: СГТУ, 2009. – 348 с.
5. Грановский, Г.И., Грановский, В.Г. Резание металлов. – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с.
6. Кравченко, Б.А., Кравченко, А.Б. Физические аспекты теории процесса резания металлов. – Самара: Самарский гос. техн. ун-т, 2002. – 167 с.
7. Марков, А.И. Ультразвуковая обработка материала-

лов. – М.: Машиностроение, 1980. – 237 с.

8. **Суслов, А.Г.** Технологическое обеспечение параметров шероховатости поверхности деталей машин при обработке лезвийным инструментом // Вестник машиностроения. – 1988. – Вып. 1. – С. 40–42.

9. **Суслов, А.Г.** Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. – М.: Машиностроение, 1987. – 341 с.

REFERENCES

1. Agapov, S.I. *Hard-to-machine Material Working Intensification at Ultrasonic Oscillation Introduction in Cutting Area*: monograph. – Volgograd: VolgaSTU, 2009. – pp. 78.

2. Agapov, S.I., Golovkin, V.V. *Efficiency Increase in Machining by Ultrasound Application*: monograph. – Samara: Publishing House of SRC, 2010. – pp. 134.

3. Agapov, S.I., Korpelyansky, O.F. Surface roughness parameter assurance at ultrasonic cutting // *Transactions of Vol-*

gograd State Technical University. 2007. – Issue 3. – pp. 9-15.

4. Brzhozovsky, B.M., Bekrenev, N.V. *Ultrasonic Engineering Processes and Equipment in Mechanical Engineering and Instrument Making*: manual – Saratov: SSTU, 2009. – pp. 348.

5. Granovsky, G.I., Granovsky, V.G. *Metal Cutting*. – М.: Higher School, 1985. – pp. 304.

6. Kravchenko, B.A., Kravchenko, A.B. *Physical Aspects of Metal Cutting Theory*. – Samara: Samara State Technical University, 2002. – pp. 167.

7. Markov, A.I. *Ultrasonic Material Machining*. – М.: Mechanical Engineering, 1980. – pp. 237.

8. Suslov, A.G. Technological support of machinery surface roughness parameters at cutter edge machining // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 1988. – Issue 1. – pp. 40-42.

9. Suslov, A.G. *Technological Support of State Parameters in Surface Layers of Parts*. – М.: Mechanical Engineering, 1987. – pp. 341.

Рецензент д.т.н. Ю.Л. Чигиринский

УДК 621.922.025

DOI: 10.30987/article_5b0e4112491081.62554846

В.Г. Гусев, д.т.н.,

Е.В. Калиновская, магистрант

(Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых,
600000, г. Владимир, ул. Горького, 87)

E-mail: prof_gusev@mail.ru

Моделирование температуры обрабатываемой поверхности при комбинированном плоском периферийном шлифовании

Разработана методика и определены начальные и граничные условия компьютерного моделирования температуры поверхности при комбинированном и традиционном шлифовании плоскостей. Установлены зависимости, связывающие температуру обрабатываемой поверхности с величиной снимаемого припуска, продольной и поперечной подачей заготовки, на основе которых назначается режим комбинированного плоского периферийного шлифования, обеспечивающий устранение термического повреждения обработанного поверхностного слоя.

Ключевые слова: комбинированное шлифование; тепловой поток; обрабатываемая поверхность; температура; моделирование; мелко- и крупнозернистый круг.

V.G. Gusev, D. Eng.,

E.V. Kalinovskaya, Master degree student

(Stoletovs State University of Vladimir, 87, Gorky Str., Vladimir, 600000)

Temperature simulation of surface worked at combined flat peripheral grinding

A procedure is developed and the initial and boundary conditions of surface temperature computer simulation at combined and common plane grinding are defined. Dependences connecting the temperature of a surface worked with the value of allowance cut off, a line feed and a cross-feed of a blank are defined on the basis of which a mode of combined flat peripheral grinding ensuring the elimination of thermal damages of a surface layer worked is set.

Keywords: combined grinding; heat current; surface worked; temperature; simulation; fine-grain and coarse-grain disks.