

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОДОЛЬНОЙ ПОДАЧИ ПРИ ПЛОСКОМ ШЛИФОВАНИИ КОНСТРУКЦИОННОЙ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

На основе совмещения контурных кривых выполнена оптимизация продольной подачи заготовки в зависимости от твёрдости обрабатываемого материала, при плоском шлифовании стали 35. Целевыми функциями выбраны: производительность процесса, тепловая напряжённость в зоне шлифования, определяемая по массе оплавленных шариков в структуре шлама, и шероховатость обработанной поверхности.

Ключевые слова: режимы резания, тепловые процессы, термическая обработка, твёрдость, фазовые превращения, стружка, шлам, шероховатость, пластическая деформация.

При шлифовании, в зоне контакта круга и заготовки, происходят сложные физико-механические и химические процессы, среди которых можно выделить адгезию, упругую и пластическую деформацию, а также фазовые превращения. Согласно закону сохранения энергии часть кинетической энергии зёрен круга и заготовки передаётся стружке, и переходит в тепловую энергию, в том числе посредством упругой деформации и механизмов пластической деформации скольжения, двойникования и межзёренного перемещения. Часть энергии идёт на изменение внутреннего состояния заготовки, что проявляется в искажении кристаллической решётки, увеличении плотности дислокаций, накоплении внутренних напряжений. Энергия Гиббса при этом повышается, и структура становится неустойчивой.

В условиях значительных контактных напряжений тепловая энергия моментально вызывает различного рода фазовые превращения, вплоть до плавления металла. Высокие мгновенные температуры с одной стороны повышают пластичность деформируемого металла и улучшают условия для образования стружки абразивными зёрнами, а с другой — вызывают структурные изменения в поверхностном слое и способствуют появлению напряжений растяжения в этих слоях [1, С. 57–59]. При этом основным механизмом пластической деформации становится скольжение. Одновременно происходят диффузионные процессы, в том числе полигонизация, рекристаллизация и иные подобные явления, приводящие к повышению устойчивости структуры.

Температура в зоне шлифования, в локальных зонах, может достигать 1100–1500 °С, и это значительно выше температур критических точек (к примеру, для стали 35 — это 730 °С и 810 °С). В других зонах температура может быть существенно меньше, что приводит к структурной неоднородности обрабатываемого материала и появлению некоторого количества фаз с разнообразными физико-механическими свойствами. Внешне это может проявляться в появлении прижогов, возникновении микротрещин (в случае критических внутренних напряжений), образовании термодинамически неустойчивых фаз (например, аустенита, в том числе с крупным размером зерна), которые переходят

в иные фазы (например, перлит) или при последующем разрушении ухудшают качество поверхностного слоя.

Контролировать процессы, вызванные неоднородностью теплового поля, при шлифовании практически невозможно, как и измерять температуры в локальных точках в условиях скоротечных термодинамических процессов. Однако меры, способствующие снижению температур в зоне резания, в некоторых случаях оказываются весьма эффективными, к которым можно отнести и выбор рациональных режимов резания.

О тепловой напряжённости процесса в зоне резания можно судить, в том числе, исходя из анализа состава шлама, собранного после шлифования заготовок. Шлам состоит из деформированной стружки, элементов расплавленного металла в виде шариков разной величины (рис. 1), абразивной пыли и иных продуктов диспергирования (разрушенных зёрен, связки, обрабатываемого металла).

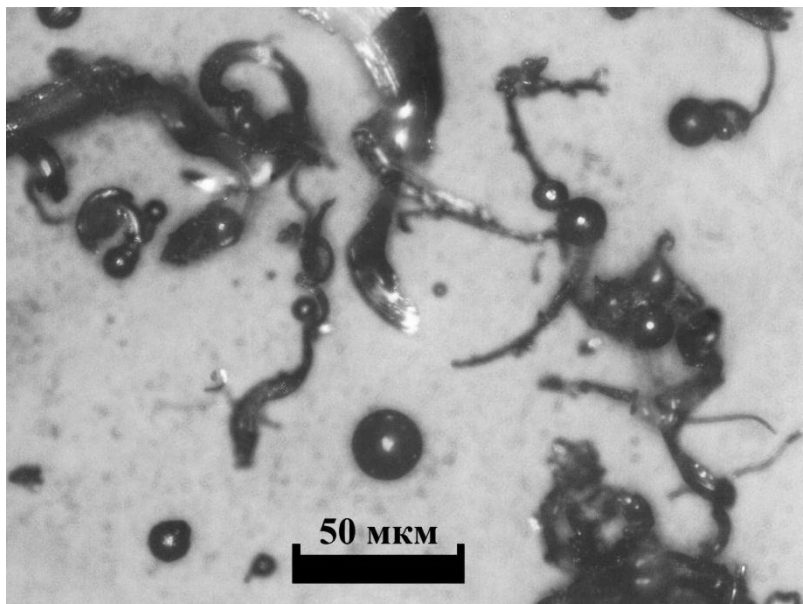


Рис. 1. Вид шлама под микроскопом (хорошо заметны стружка и шарики оплавленного металла)

Целью данной работы является оптимизация величины продольной подачи стола при плоском шлифовании, исходя из максимальной производительности, минимальной шероховатости и минимальной тепловой напряжённости в зоне резания применительно к конструкционной углеродистой стали марки 35, в зависимости от твёрдости заготовки. Тепловую напряжённость в зоне резания предлагается оценивать по массе оплавленных шариков в составе некоторого равного количества шлама.

Существующий математический аппарат и возможности современной техники позволяют моделировать различные технологические процессы и проводить обработку экспериментальных данных по известным методикам. При этом не только сокращается время на проведение научных исследований, но и

появляется возможность обнаружить оптимальные решения, которые не очевидны после серии проведённых опытов.

Одним из таких вариантов оптимизации является метод совмещения контурных кривых. В этом случае анализируются поверхности уровня функций отклика и, в зависимости от выбранных ограничений, обнаруживается область факторного пространства, одновременно удовлетворяющая указанным требованиям. В данной работе был применён метод композиционного планирования эксперимента.

При проведении экспериментальных исследований в качестве заготовок использовались специально подготовленные образцы из конструкционной углеродистой стали 35 (ГОСТ 1050–88), которые были предварительно термически обработаны различными методами. Характеристика исходных образцов представлена в табл. 1.

Факторами активного эксперимента являлись твердость заготовки по Бринеллю (фактор x_1) и величина продольной подачи (фактор x_2). Факторное пространство определялось исходя из минимальной (образец № 1) и максимальной (образец № 3) твердости заготовок, а также минимальной (11,95 м/мин) и максимальной (19,43 м/мин) подачи, устанавливаемой на плоскошлифовальном станке модели 3Г71. Оба фактора эксперимента имели по три уровня. Средний уровень фактора x_1 (твердость) соответствовал образцу № 2. Уровни факторов в натуральном и условном (после нормализации) масштабах представлены в табл. 2.

Таблица 1

Характеристика исходных образцов

Параметры	Номер образца		
	1	2	3
Вид термообработки, охлаждающая среда	диффузионный отжиг 1100 °С, печь	закалка 850 °С, отпуск 400 °С, вода	закалка 850 °С, отпуск 200 °С, вода
Твёрдость	НВ 110	29 HRC _Э (НВ 271)	46HRC _Э (НВ 432)
Микро-структура	Перлит+феррит	Троостит	Мартенсит

Таблица 2

Уровни факторов в натуральном и условном масштабах

Параметр	Фактор	Средний уровень	Шаг варьирования	Значение уровней переменных соотв. условных единиц		
				-1	0	+1
Твёрдость, НВ	x_1	271	161	110	271	432
Подача, м/мин	x_2	15,69	3,74	11,95	15,69	19,43

Скорость резания во всех случаях была равной 35,5 м/с. В качестве абразивного инструмента использовался шлифовальный круг из электрокорунда белого марки 1 250x20x76 WA F30 L6V 50 2. Шлифование производилось по следующей схеме: 10 двойных ходов стола с вертикальной подачей по 10 мкм за каждый двойной ход с последующим выхаживанием — 10 двойных ходов стола без вертикальной подачи.

Равное количество шлама, отмеренное специальной меркой, собранного после шлифования различных образцов, распределялось равномерным слоем на предметное стекло и рассматривалось под микроскопом модели Axiovert 40 MAT (Германия) с увеличением 200^{\times} , предназначенным для проведения металлографических исследований.

Масса оплавленного металла определялась исходя из объёма каждого шарика и плотности стали ($\rho = 7826 \text{ кг/м}^3$) — отклик Y_1 . Производительность обработки оценивалась по массе снятого металла, отнесённая к площади поверхности заготовки (удельная масса) — отклик Y_2 . Взвешивание заготовок до и после обработки производилось на аналитических весах мод. AXIS 200 (Польша) с точностью до 0,0001 грамма. Параметр шероховатости Ra измерялся профилографом-профилометром модели 250 (Россия) — отклик Y_3 . Матрица планирования эксперимента и отобранные для математической обработки данные испытаний приведены в табл. 3.

Графическая интерпретация обработанных экспериментальных данных представлена на рис. 2–5. На графиках изображены линии равного уровня откликов функций Y_1 , Y_2 и Y_3 в зависимости от факторов эксперимента: твёрдости материала заготовки (НВ) и продольной подачи стола при плоском шлифовании (м/мин).

Таблица 3

Матрица планирования и результаты испытаний

Но- мер опы- та	Планирова- ние, усл. ед.		Результаты испытаний, физич. ед.		
	x_1	x_2	Y_1 – масса оплав- ленного металла, мкг	Y_2 – удельная масса снятого металла, мкг/мм ²	Y_3 – параметр шероховатости, Ra
1	–1	–1	1,8086	0,7558	0,322
2	+1	–1	2,7167	0,7504	0,243
3	–1	+1	4,1188	0,8004	0,351
4	+1	+1	3,6156	0,7723	0,318
5	0	0	3,2318	0,7751	0,347
6	+1	0	2,5480	0,7687	0,259
7	–1	0	3,1888	0,6220	0,339
8	0	+1	3,4469	0,7754	0,367
9	0	–1	1,6370	0,7578	0,329

На рис. 2 показано влияние указанных факторов на количество оплавленного металла в структуре шлама. Из рисунка видно, что во всём факторном пространстве при увеличении продольной подачи стола количество оплавленного металла (а значит и тепловая напряжённость в зоне резания) увеличивается. Причём для более пластичного металла, имеющего твёрдость HB110, эта напряжённость растёт быстрее.

Данный факт можно объяснить тем, что при обработке менее твёрдого незакалённого металла стружка снимается, преимущественно, путём пластического деформирования, при котором выделяется большое количество теплоты, особенно при увеличении скорости подачи, когда длина дуги контакта единичных зёрен круга с заготовкой больше. При обработке закалённых образцов, с твёрдостью HB271 и HB432 тепловая напряжённость, при увеличении подачи, растёт не так интенсивно, хотя при небольших подачах тепловыделение у твёрдых образцов немного выше. Это говорит о том, что в этом случае при повышении подачи всё больше стружки снимается скалыванием, а пластическая деформация проявляется всё в меньшей степени, но прочность образцов, особенно имеющих микроструктуру мартенсит, изначально выше.

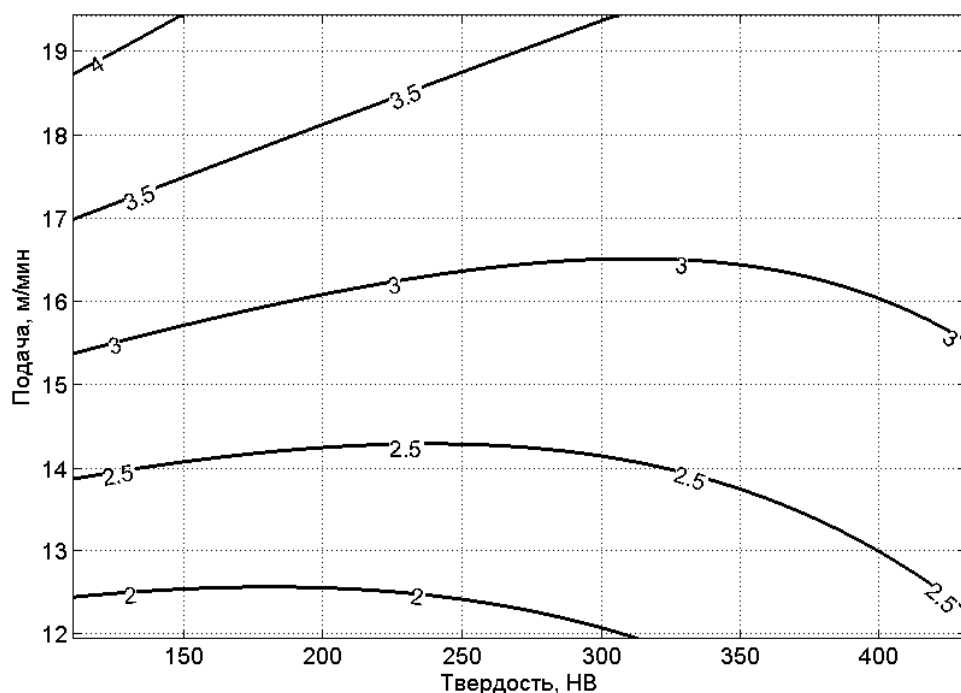


Рис. 2. Влияние подачи и твёрдости материала заготовки на количество оплавленного металла, микрограммы

Влияние твёрдости и подачи на производительность процесса (массу снятого металла) показано на рис. 3. Видно, что при обработке закалённой стали влияние подачи не так заметно, как при обработке стали после отжига. При средних подачах во всех случаях производительность чуть меньше. Вероятно, это связано с тем, что при незначительном увеличении подачи, количество зёрен, круга вступивших в контакт с заготовкой в единицу времени уменьшается, а обрабатываемый материал ещё недостаточно размягчился, и больше оттесняется по сторонам зерна. При дальнейшем повышении подачи, в связи с повышением температуры

(рис. 2) и повышением пластичности заготовок, производительность увеличивается. Стружка и оплавленный металл легче удаляются с поверхности.

Влияние факторов эксперимента на шероховатость обработанной поверхности показано на рис. 4. Во всех случаях при увеличении подачи параметр шероховатости увеличивается. Это можно объяснить тем, что при увеличении подачи, количество активных зёрен круга в единицу времени (при равном количестве двойных ходов) уменьшается. С увеличением твёрдости обрабатываемого материала закономерного снижения высоты микронеровностей не наблюдается, что также отмечено в работе [2, С. 115–117].

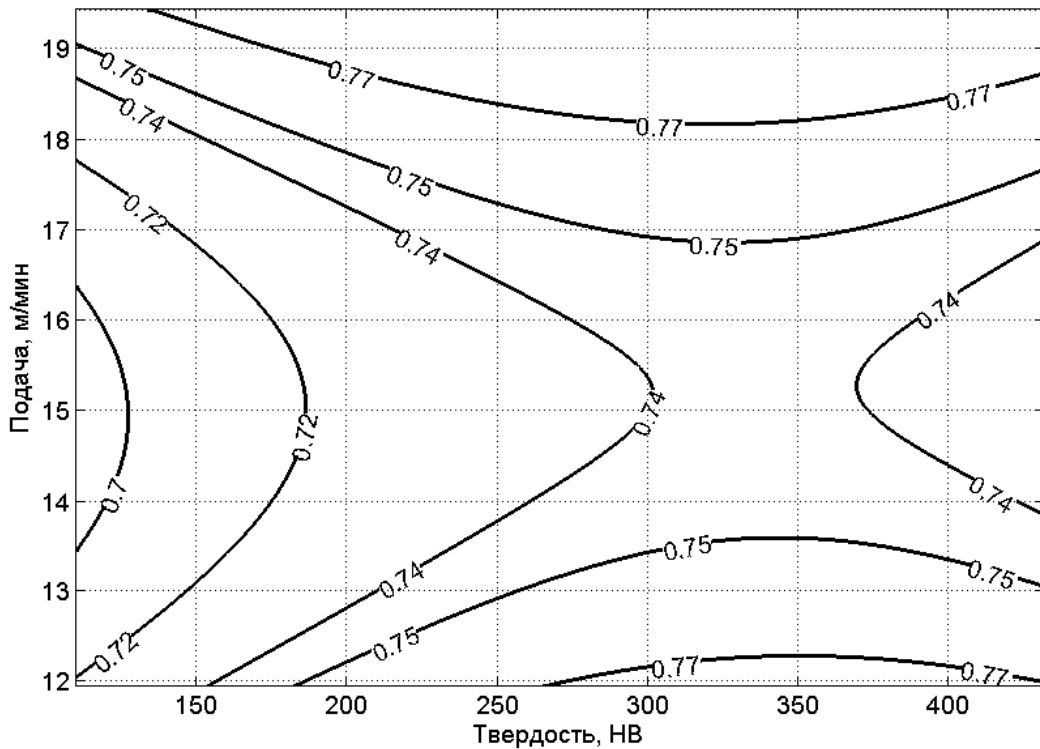


Рис. 3. Влияние подачи и твёрдости на удельную массу металла, снятого с поверхности заготовки, микрограмм/мм²

Наложив контурные кривые друг на друга (рис. 5), имеется возможность обнаружить область (или области) факторного пространства, удовлетворяющие некоторым ограничениям. Допустим, требуется выбрать оптимальную подачу при шлифовании образца из стали 35, имеющего твёрдость НВ 320, при этом должна быть обеспечена максимальная производительность процесса и качество поверхностного слоя.

Для заданной твёрдости, рассмотрим две области — *A* и *B* (рис. 4). И в первом и во втором случаях эти области обеспечивают достаточно высокую производительность, соответствующую граничным линиям 0,75 и 0,77 единиц (в данном случае единицы измерения не важны). Зона *A* ограничена также линиями шероховатости $Ra\ 0,34$ и $Ra\ 0,35$, в то время как зона *B* — ограничена линиями шероховатости $Ra\ 0,30$ и $Ra\ 0,33$. То есть параметр шероховатости во второй области несколько ниже, что говорит в пользу выбора области *B*. Кроме того, в области *B* наблюдается значительно меньшее количество оплавленного

металла в структуре шлама. То есть температура в зоне резания в этом случае будет меньше, что снизит величину напряжений растяжения. Следовательно, при шлифовании заготовки из стали 35, имеющей твердость HB320, рекомендуемая продольная подача должна быть около 13 м/мин.

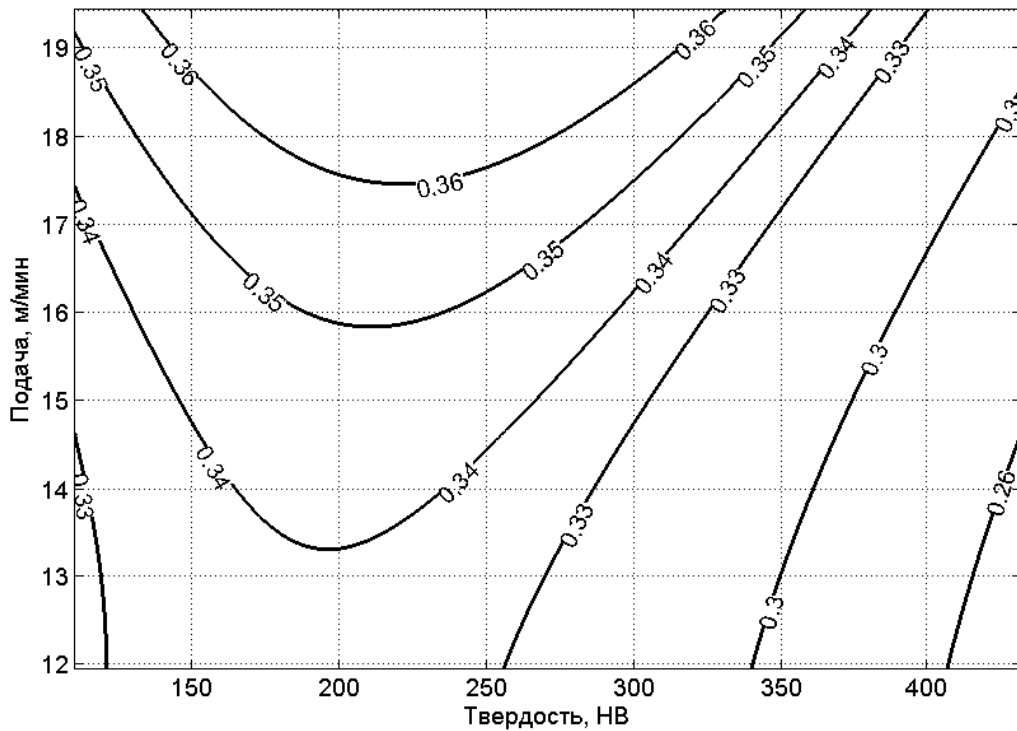


Рис. 4. Влияние подачи и твёрдости заготовки на параметр шероховатости Ra

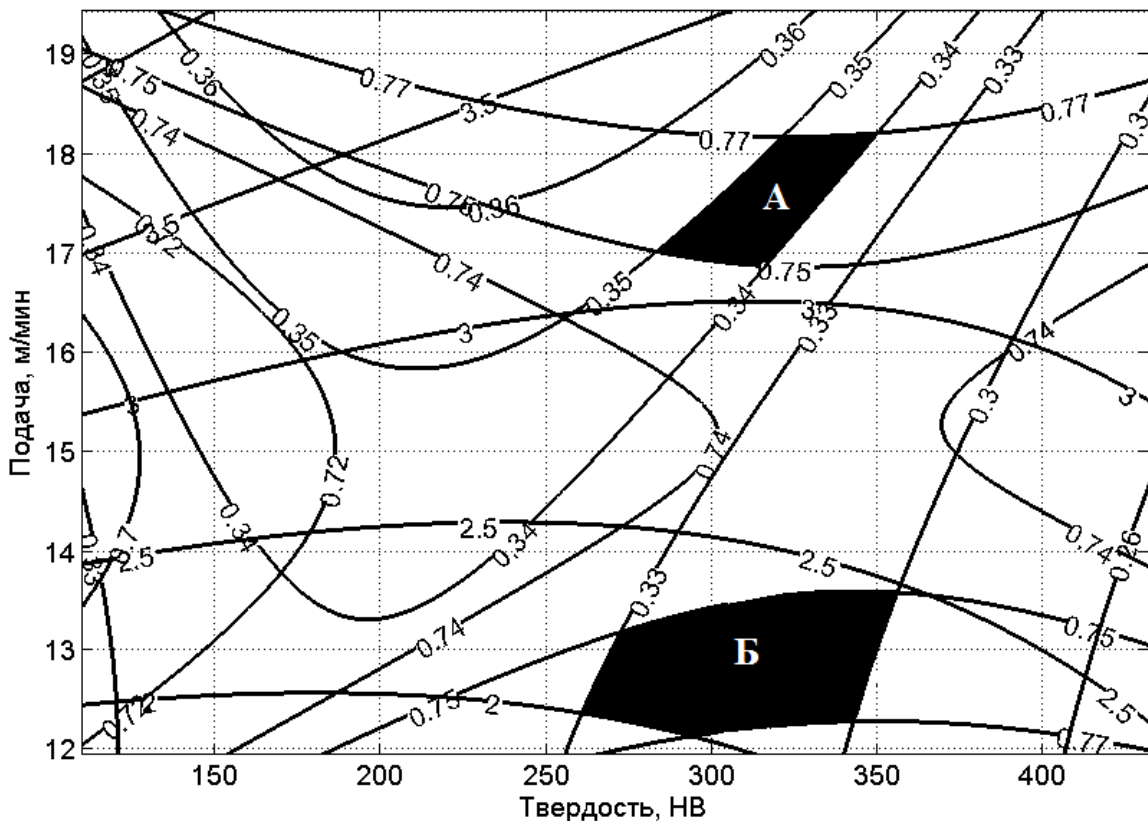


Рис. 5. Совмещение линий контурных кривых функций отклика в рамках факторного пространства

Выводы:

1. По количеству расплавленного металла в составе шлама можно судить о силовой и тепловой напряжённости процесса шлифования.

2. При обработке пластичных материалов, при повышении величины продольной подачи, тепловая напряжённость растёт более интенсивно, чем при обработке хрупких материалов. Это связано с тем, что в первом случае преобладают процессы пластической деформации, при которых выделяется значительное количества тепла.

3. Метод наложения контурных кривых позволяет сократить время на проведение научных исследований, и обнаружить оптимальные решения, которые не являются очевидными после серии проведённых опытов.

Литература

1. Люпа Д. С. Технологические возможности процесса торцового планетарного шлифования / Д. С. Люпа, Т. Н. Иванова // Информационные технологии в инновационных проектах: труды IV междунар. науч.-техн. конф. Ижевск, 29–30 мая 2003 г. Ч. 3. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2003. С. 57–59.
2. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания / А. Д. Макаров. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.

Об авторах

Никифоров Игорь Петрович — профессор кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВПО ПсковГУ, д-р. техн. наук, доцент.

E-mail: nikiforov.i.p@mail.ru

Мальцев Павел Николаевич — инженер кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВПО ПсковГУ.

E-mail: inertan@gmail.com

I. P. Nikiforov, P. N. Maltsev

**OPTIMIZATION OF THE LONGITUDINAL FEED DURING
SURFACE GRINDING STRUCTURAL CARBON STEEL**

The optimization of the longitudinal feed of the workpiece, depending on the hardness of the material, based on the combination of contour curves is executed, with surface grinding of steel 35. Objective functions are selected: process productivity, thermal stresses in the grinding zone, defined by the mass off used beads in the structure of sludge, and surface finish.

Keywords: cutting conditions, thermal process, heat treatment, hardness, phase transformations, chip, sludge, surface finish, plastic deformation.