

УДК 621.8; 621.9; 65.011.56

Д.М. Медведев, В.А. Хандожко

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНТАКТНОЙ ЖЕСТКОСТИ ШЛИФОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ИХ СТЫКОВ

Рассмотрены разработка и экспериментальная проверка алгоритма и программы для автоматизированного технологического обеспечения нормальной статической контактной жесткости шлифованных поверхностей деталей машин и их стыков на стадии конструкторско-технологической подготовки производства.

Ключевые слова: нормальная статическая контактная жесткость, автоматизированное технологическое обеспечение, шлифование, детали машин, подготовка производства.

Эксплуатационные свойства деталей и их соединений в изделии определяют качество и надежность машин. Одно из основных эксплуатационных свойств – нормальная статическая контактная жесткость поверхностей деталей машин и их стыков. Общеизвестно, что доля контактных перемещений в общих деформациях деталей и их стыков в машине под нагрузкой очень велика (например, в технологическом оборудовании она достигает до 80%). Поэтому контактная жесткость в значительной степени определяет точность и долговечность машин.

Контактная жесткость зависит от состояния поверхности детали, которое формируется на финишных операциях технологических процессов механической обработки и характеризуется совокупностью геометрических и физико-механических параметров качества. Наиболее распространенной финишной операцией является шлифование, позволяющее обеспечить высокое качество поверхностного слоя и точность размеров детали [16; 17].

Сейчас развивается новое научное направление в технологии машиностроения – одноступенчатое технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений, которое основывается на объединении и автоматизированном решении задач конструктора и технолога для определения оптимальных условий обработки деталей на стадии конструкторско-технологической подготовки производства [4; 6; 9-12; 14]. Для реализации автоматизированного технологического обеспечения рассматриваемого эксплуатационного свойства необходимы эмпирические или теоретические формулы взаимосвязи контактной жесткости с условиями шлифования различных видов поверхностей деталей машин.

При эмпирическом моделировании устанавливается непосредственная функциональная взаимосвязь между условиями шлифования детали и контактной жесткостью путем проведения специально поставленных опытов в определенных условиях. В результате обработки опытных данных получают эмпирические формулы – обычно в виде степенных функций. Недостатки эмпирического моделирования: частный характер получаемых формул, отсутствие в них ясно выраженного физического содержания, необходимость проведения большого числа трудоемких опытов. Однако при проведении многофакторного экстремального эксперимента с использованием автоматизированных систем научных исследований (АСНИ) последний недостаток теряет актуальность. Например, для плоских поверхностей деталей машин в [14] эмпирические формулы получены в результате многофакторного экстремального эксперимента, выполненного с применением АСНИ контактной жесткости [13]. Данные эмпирические формулы учитывают небольшое число условий шлифования (твердость материала детали, зернистость шлифовального круга, скорость

заготовки и поперечной подачи, число выхаживаний) и справедливы только в пределах условий проведенного эксперимента.

При теоретическом моделировании обычно используется метод подстановки, при котором сначала определяются параметры качества поверхностного слоя детали в зависимости от условий шлифования, затем для найденных параметров качества рассчитывается контактная жесткость. Получаемые данным методом теоретические формулы обладают большей универсальностью, чем эмпирические, так как справедливы для всего диапазона учитываемых в них параметров и условий, но менее точны и достаточно громоздки. Однако при автоматизированном расчете последний недостаток становится незначимым, поэтому для реализации автоматизированного технологического обеспечения контактной жесткости оптимальным является использование метода подстановки. Например, в [14] для плоских поверхностей деталей машин теоретические формулы получены методом подстановки зависимостей параметров качества поверхностного слоя деталей машин от условий их шлифования в формулы для определения контактной жесткости из [9].

В [4; 9] получены теоретические формулы для определения параметров качества поверхностного слоя детали (шероховатости, волнистости, макроотклонения и степени упрочнения) в зависимости от условий абразивной обработки. Однако в данных формулах учитывается небольшое число условий шлифования и отсутствует единый подход к описанию формирования профиля неровностей шлифованной поверхности.

Этих недостатков лишена теоретическая модель формирования параметров качества поверхностного слоя детали [2], учитывающая весь комплекс взаимосвязанных условий абразивной обработки: материал и размеры обрабатываемой поверхности детали; материал абразива, диаметр, высоту, скорость, зернистость, твердость, номер структуры, класс неуравновешенности и режимы алмазной правки шлифовального круга; глубину шлифования; скорость заготовки и поперечной подачи, число выхаживаний. Кроме того, данная модель может быть использована для различных видов абразивной обработки (плоского, круглого наружного и внутреннего шлифования).

В [4; 9] получены теоретические зависимости нормальной контактной жесткости неподвижного стыка двух деталей от параметров качества их поверхностного слоя при первом и повторных нагружениях:

$$j_1 = \frac{P}{Ay_1}; j_{\text{повт}} = \frac{P}{Ay_{\text{повт}}},$$

где P – нагрузка на стык; A – геометрическая площадь контакта; $y_1, y_{\text{повт}}$ – нормальные контактные перемещения при первом и повторном (6-кратном) нагружении соответственно.

$$y_1 = (y_{\text{пл1}} + y_{\text{уп1}}) + (y_{\text{пл2}} + y_{\text{уп2}}); y_{\text{повт}} = y_{\text{уп1}} + y_{\text{уп2}}.$$

Здесь $y_{\text{пл1}}, y_{\text{пл2}}$ – пластические контактные деформации поверхностных слоев первой и второй контактирующих деталей соответственно; $y_{\text{уп1}}, y_{\text{уп2}}$ – упругие перемещения нижележащих слоев первой и второй контактирующих деталей соответственно.

Заменив в формулах из [4; 9] величину $H\mu_0$ на $ck\sigma_T$, получим

$$y_{\text{пл}} = \pi \left(\frac{2\pi PRaWzH \max}{Ack\sigma_T} \right)^{1/3}; \quad (1)$$

$$y_{\text{уп}} = 2\pi \frac{1-\mu^2}{E} ck\sigma_T Sm \frac{y_{\text{пл}}}{Ra},$$

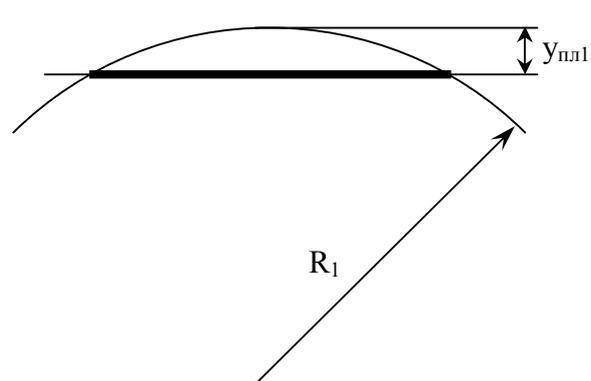
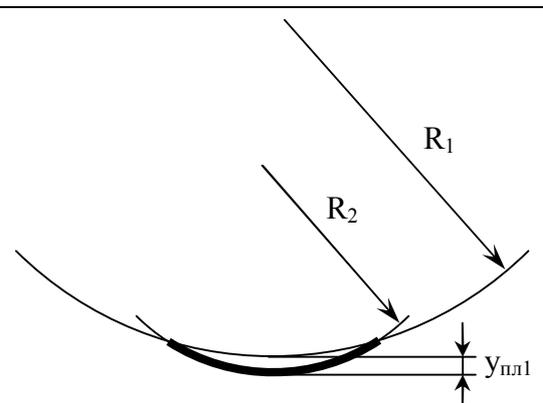
где $Ra, Wz, H\max$ – параметры шероховатости, волнистости и макроотклонений поверхностного слоя детали соответственно; c – коэффициент стеснения (можно принять $c = 3$); k – степень упрочнения поверхностного слоя детали; σ_T, μ, E – предел текучести, коэффициент Пуассона и модуль упругости материала детали соответственно; Sm – средний шаг

выступов шероховатости.

Для определения контактной жесткости поверхности только одной детали с учетом ее шероховатости и волнистости по методическим рекомендациям [1; 13] путем вдавливания оснований закаленных до твердости 62-63 HRCэ инденторов с шероховатостью Rz 0,05–0,10 мкм под нагрузкой необходимо знать номинальную площадь A_a контакта. В табл. 1 приведены результаты геометрического расчета величины A_a для различных видов поверхностей деталей при условии абсолютной гладкости и жесткости инденторов ($y_{пл2} + y_{уп2} = 0$).

Таблица 1

Геометрический расчет номинальной площади A_a контакта поверхности детали с основаниями абсолютно гладких и жестких инденторов

Вид поверхности детали	Число и вид инденторов	Тип контакта	Схема и зависимость для расчета величины A_a
Плоская	3 цилиндрических с плоским основанием	Плоскость – плоскость	$A_a = 3\pi \frac{D_2^2}{4}$
Наружная цилиндрическая	2 цилиндрических с плоским основанием	Плоскость – цилиндр	 $A_a = 4\sqrt{2}R_1^{0,5}D_2y_{пл1}^{0,5}$
Внутренняя цилиндрическая	2 с цилиндрическим основанием	Цилиндр – цилиндрическая впадина	 $A_a = 2\sqrt{2} \left(\frac{R_2}{1 - \frac{R_2}{R_1}} \right)^{0,5} L_2 y_{пл1}^{0,5}$

После подстановки зависимостей из табл. 1 в формулу (1) при условии отсутствия макроотклонений ($H_{\max} = 0$; $A = A_a$) получим теоретические формулы для расчета пластических контактных деформаций поверхностных слоев при нормализованном определении контактной жесткости с учетом шероховатости и волнистости для различных видов поверхностей деталей:

– для плоских

$$y_{\text{пл1}} = \pi \left(\frac{8PRa_1 Wz_1}{3D_2^2 c k \sigma_T} \right)^{1/2};$$

– для наружных цилиндрических

$$y_{\text{пл1}} = \pi \left(\frac{\pi PRa_1 Wz_1}{2\sqrt{2}R_1^{0,5} D_2 c k \sigma_T} \right)^{1/2,5};$$

– для внутренних цилиндрических

$$y_{\text{пл1}} = \pi \left(\frac{\pi PRa_1 Wz_1}{\sqrt{2} \left(\frac{R_2}{1 - R_2/R_1} \right)^{0,5} L_2 c k \sigma_T} \right)^{1/2,5}.$$

Здесь R_1 – радиус детали; D_2 – диаметр цилиндрического индентора с плоским основанием; R_2 , L_2 – соответственно радиус и длина цилиндрического основания индентора.

Автоматизированное технологическое обеспечение рассматриваемого эксплуатационного свойства реализует алгоритм определения оптимальных по производительности условий шлифования, обеспечивающих допустимую контактную жесткость поверхностей деталей и их стыков (рис. 1, 2). Сначала вводятся исходные данные, которые в случае обеспечения контактной жесткости стыка будут одинаковы для обеих поверхностей образующих его деталей. При этом выбор вида шлифования позволяет задавать шероховатость поверхности детали. Затем выбирается материал абразивных зерен в зависимости от материала поверхности по справочным рекомендациям [7]. После этого выбираются диапазоны и шаг изменения условий в зависимости вида и типа шлифования с учетом возможностей шлифовальных станков и стандартных параметров шлифовальных кругов (табл. 2) [7]. Далее обнуляются число выхаживаний I , максимальная производительность шлифования Q_{\max} , максимально достижимая контактная жесткость j_{\max} .

Затем среди всех возможных сочетаний выполняется последовательный поиск наиболее производительных условий шлифования, обеспечивающих допустимую контактную жесткость при условии отсутствия прижогов на поверхности, которое проверяется по допустимой производительности $Q_{\text{доп}}$ (рис. 2). Контактная жесткость рассчитывается методом подстановки параметров качества поверхностного слоя, определяемых по модели из [2], в теоретические зависимости из [9], причем при нормализованном определении с учетом шероховатости и волнистости используются полученные выше формулы для расчета величины $y_{\text{пл}}$. При поиске запоминаются наилучшие условия шлифования, обеспечивающие максимально достижимую контактную жесткость.

Если поиск завершился неудачей, то изменяется число выхаживаний I от 1 до 8 с шагом 1 при наилучших условиях шлифования и повторяется расчет контактной жесткости (рис. 1). Когда допустимая контактная жесткость не обеспечивается выхаживанием при выбранном типе шлифования, выводится предупреждающее сообщение и алгоритм завершается. Если наиболее производительные условия шлифования найдены (с выхаживанием или без), то выбираются режимы алмазной правки по справочным рекомендациям

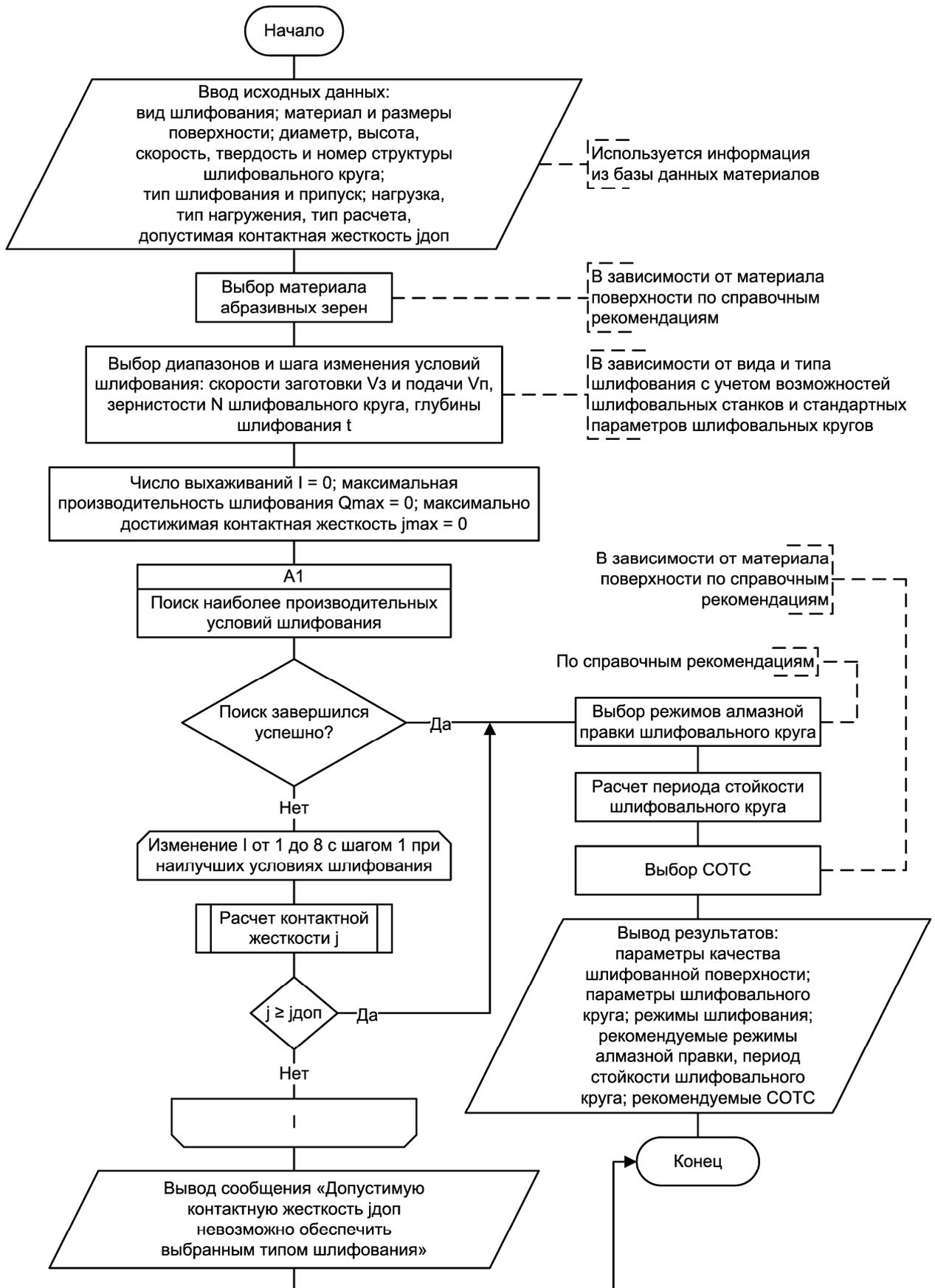


Рис. 1. Блок-схема алгоритма автоматизированного технологического обеспечения контактной жесткости шлифованных поверхностей деталей машин и их стыков

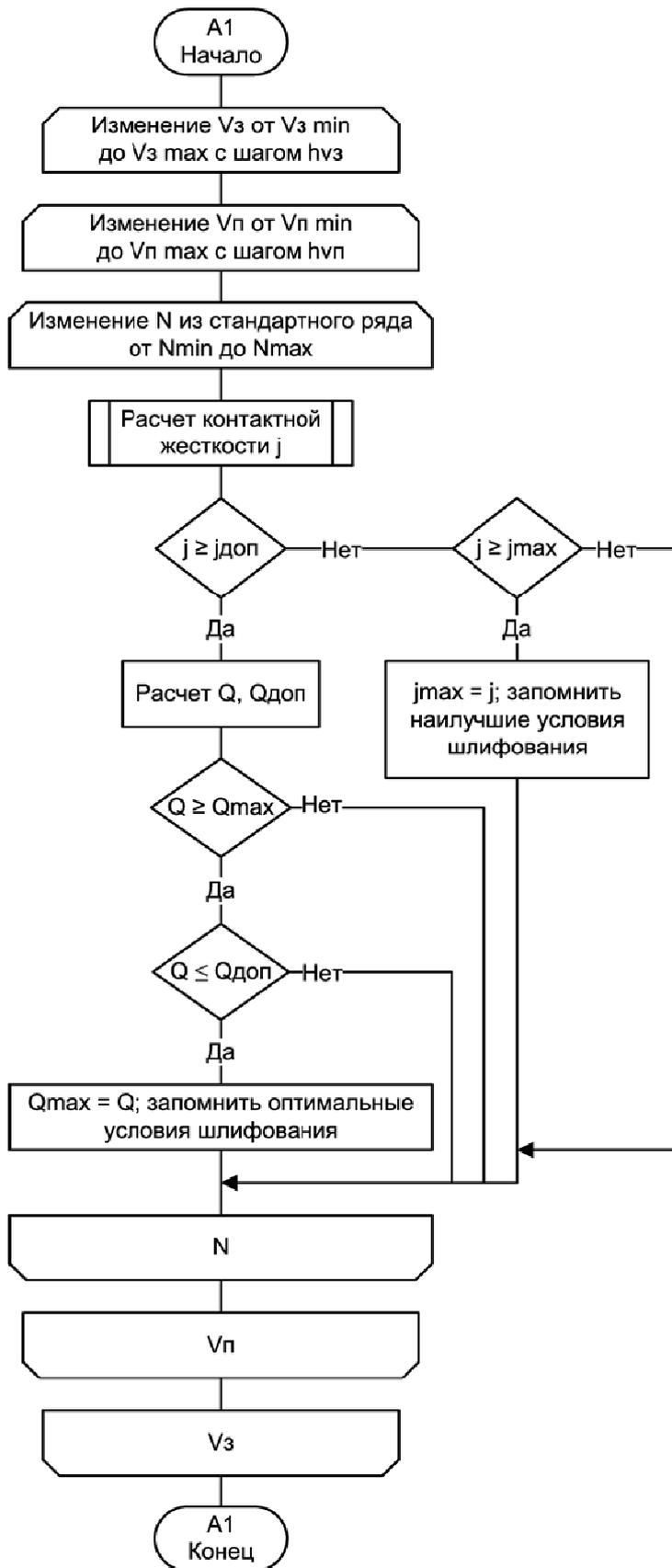


Рис. 2. Блок-схема алгоритма поиска наиболее производительных условий шлифования

[2] и рассчитывается период стойкости шлифовального круга, выбирается смазочно-охлаждающее технологическое средство (СОТС) в зависимости от материала поверхности по справочным рекомендациям [15]. В итоге алгоритм завершается выводом результатов.

По разработанному алгоритму средствами объектно-ориентированного языка программирования Delphi была написана программа OptiCont (рис. 3). Ввиду громоздкости и сложности используемых теоретических моделей код программы содержит несколько классов, которые расположены в отдельных модулях. При отладке программы проверялся каждый метод класса с помощью пошагового выполнения.

Стык – это соединение деталей, прикладываемых одна к другой. Материалы деталей машин, наиболее часто используемые в стыках, определялись на примере металлорежущих станков и станочных приспособлений (табл. 3) [3].

На основе табл. 3 по справочным данным [5] была создана база данных материалов, содержащая следующие поля: имя (марка), тип (0 – сталь; 1 – чугун), твердость по Бринеллю (НВ), предел текучести (σ_T), предел прочности (σ_B), сужение после разрыва (ψ), относительное равномерное сужение (ψ_p), модуль упругости (E), коэффициент Пуассона (μ), коэффициенты для расчета периода стойкости круга, тип СОТС. База данных материалов представляет собой файл формата dBASE (рис. 4).

Таблица 2

Диапазоны изменения условий в зависимости от вида и типа шлифования

Тип шлифования	Условия шлифования						
	$V_z \text{ min,}$ М/МИН	$V_z \text{ max,}$ М/МИН	$V_p \text{ min,}$ ММ/ХОД (М/МИН)	$V_p \text{ max,}$ ММ/ХОД (М/МИН)	N_{min}	N_{max}	t, МКМ
Плоское периферией круга							
Предварительное	25	30	5	10	32	80	25
Чистовое	10	25	2	5	25	40	15
Тонкое	5	15	0,5	2	16	32	5
Круглое наружное							
Предварительное	25	40	20	30	32	80	25
Чистовое	20	30	10	20	25	50	15
Тонкое	12	25	5	15	16	32	5
Круглое внутреннее							
Предварительное	40	60	10	20	32	80	20
Чистовое	30	50	10	15	25	50	10
Тонкое	20	40	2	10	16	32	5

OptiCont - Расчет оптимальных условий шлифования

Плоское | Круглое наружное | Круглое внутреннее

Параметры поверхности
 Материал: Сталь 45 (167...207 HB)
 Длина, мм: 90 | Ширина, мм: 40 | Круглая

Параметры шлифовального круга
 Диаметр, мм: 200 | Высота: 25
 Скорость, м/с: 30 | Твердость: CM2
 Номер структуры: 7 | Класс неуравнов.: 2

Параметры шлифования
 Тип шлиф.: Чистовое | Припуск, мкм: 50

Параметры эксплуатации
 Нагрузка, Н: 14400 | Тип нагружения: Первое Повторное
 Расчет по нормали
 Допустимая контактная жесткость, МПа/мкм: 0.36

Расчет

Настройки... | **О программе...**

Результаты:

Параметры качества шлифованной поверхности

R_{max}	R_a	R_z	R_p	W_{max}	W_z	W_p	H_{max}	H_p	k
3,00	0,45	2,50	1,20	0,95	0,79	0,48	11,94	5,97	1,46

Параметры шлифовального круга
 Материал абразива: 13A...15A | Зернистость: 25

Режимы шлифования

Глубина шлиф., мкм	Скор. заготовки, м/мин	Подача, мм/ход	Число ходов	Число выжиганий
15	16,0	5,0	4	0

Рекомендуемые режимы алмазной правки шлифовального круга

Продольная подача, м/мин	Поперечная подача при ходах, мм/дв.ход		Число выжиганий
	Черновых	Чистовых	
0.4...0.6	0.02...0.03	0.01	1...2

Период стойкости шлифовального круга: 59 мин

Рекомендуемые СОТС:
 * Синтетические СОТС:
 - 0.5...2% кальцинированной соды, 0.2...1% нитрита натрия
 - 0.5...1.5% триэтанолamina, 0.25...0.6% нитрита натрия (или мылонафта), до 0.6% глицерина
 - (СОЖ "МОТ-2"): 0.2% мылонафта, 1% олеиновой кислоты, 0.5% триэтанолamina
 - 0.25...1% буры, 0.6...0.25% триэтанолamina, до 0.25% нитрита натрия
 * Эмульсии:
 - 3% НГЛ-205 ТУ 38-1-242-69
 - 5% НГЛ-205 ТУ 38-1-242-69
 - 2% Укринол-1 ТУ 38-101-197-72

Рис. 3. Программа OptiCont

Таблица 3

Материалы деталей в стыках металлорежущих станков и станочных приспособлений

Вид деталей	Материалы
Направляющие	СЧ20, СЧ30, 20Х, 18ХГТ, ШХ15, 9ХС, ХВГ
Корпуса	СЧ15, СЧ20, Ст3
Гильзы, стаканы, фланцы, регулировочные кольца	45, 40Х, 20Х, 38ХМЮА, У8А
Столы и станочные принадлежности	45, 20Х, У8А, 12ХН3А
Универсально-сборные приспособления	20Х, У8А, 12ХН3А

	NAME	MTYPE	HB	SIGMAT	SIGMAV	PSI	PSIR	E	MU	CT	KC	N_	SOTSTYPE
▶	Сталь 45 (167...207 HB)	0	187	315	570	38	19	2.04	0.26	110	0.90	1.9	0
	Сталь 45 (187...229 HB)	0	208	395	615	45	19	2.04	0.26	110	0.90	1.9	0
	Сталь 45 (40...50 HRC)	0	427	950	1200	22	10	2.04	0.26	65	0.85	1.7	0
	Сталь 20Х (156...197 HB)	0	177	275	530	40	12	2.07	0.28	110	0.90	1.9	1
	Сталь 20Х (54...62 HRC)	0	582	1620	2030	10	5	2.07	0.28	65	0.85	1.7	1
	Сталь 40Х (212...248 HB)	0	230	490	655	45	13	2.19	0.28	110	0.90	1.9	1
	Сталь 18ХГТ (56...62 HRC)	0	597	1660	2080	10	5	2.04	0.28	55	0.85	1.7	1
	Сталь 12ХН3А (58...63 HRC)	0	627	1700	2130	10	5	2.04	0.28	65	0.85	1.7	1
	Сталь 38ХМЮА (65...68 HRC)	0	700	2050	2400	5	2	2.04	0.28	55	0.85	1.7	1
	Сталь ШХ15 (61...64 HRC)	0	650	1670	2160	10	5	2.10	0.28	55	0.85	1.7	1
	Сталь У8А (62...64 HRC)	0	643	1850	2310	10	5	2.00	0.26	65	0.85	1.7	2
	Сталь 9ХС (62...64 HRC)	0	643	1760	2200	10	5	2.10	0.28	55	0.85	1.7	2
	Сталь ХВГ (60...62 HRC)	0	611	1700	2130	10	5	2.22	0.28	65	0.85	1.7	2
	Чугун СЧ20 (170...241 HB)	1	205	147	196	2	1	0.85	0.25	100	0.90	1.9	3
	Чугун СЧ30 (181...256 HB)	1	220	250	294	3	2	1.25	0.25	100	0.90	1.9	3

Рис. 4. База данных материалов

Для экспериментальной проверки разработанных алгоритма и программы была изготовлена пара плоских прямоугольных образцов из незакаленной (HB 190) стали 45 с размером стыкуемой плоской поверхности 90×40 мм. Один из образцов имеет отверстие диаметром 32 мм, необходимое для его закрепления на опоре измерительного узла АСНИ контактной жесткости, разработанной на кафедре «Автоматизированные технологические системы» УНТИ БГТУ. Для обеспечения базирования второго образца на измерительном столике АСНИ было изготовлено специальное приспособление. Кроме этого, была написана программа, реализующая расчет контактной жесткости по заданным условиям шлифования [8].

Образцы шлифовались парами при их установке длинной стороной вдоль направления продольной подачи стола плоскошлифовального станка мод. 3Е710В. Варьировались скорость продольной подачи V_z и поперечная подача V_n стола станка. Неизменными были глубина шлифования $t = 15$ мкм и параметры шлифовального круга 1 200×25×32 15А 25 СМ2 7 К5 35 м/с А 2 кл. ГОСТ 2424–83. Перед шлифованием круг правился алмазным карандашом на следующих режимах: 3 хода с глубиной 0,02 мм и 2 хода с глубиной 0,01 мм.

Геометрические параметры R_{max} и W_{max} качества поверхностного слоя образцов после шлифования в продольном и поперечном направлениях измерялись на профилометрах мод. 170311 завода «Калибр» и MarSurf PS1 немецкой фирмы «Maht». Максимальная высота R_{max} выступов шероховатости определялась по показаниям профилометра, максимальная высота W_{max} волн получена путем обработки волнограмм и графиков профиля поверхности.

Величины контактных перемещений и контактной жесткости при заданном давлении для первого и повторного нагружений стыка двух одинаково шлифованных образцов измерялись с помощью АСНИ. Для геометрической площади контакта $A = 2800 \text{ мм}^2$ максимальное давление 4 МПа достигалось при нагрузке на стык $P = 11300 \text{ Н}$.

В результате опытов получены расчетные и эмпирические значения параметров качества поверхностного слоя деталей, контактной жесткости их стыка при давлении 4 МПа (табл. 4), кривые контактных перемещений.

Таблица 4
Результаты экспериментальной проверки разработанных алгоритма и программы

№ опыта	V_3 , м/мин	$V_п$, мм/ход	$\frac{R_{\text{max}_{\text{прод}}}}{R_{\text{max}_{\text{поп}}}}$,		$\frac{W_{\text{max}_{\text{прод}}}}{W_{\text{max}_{\text{поп}}}}$,		$\frac{j_1}{j_{\text{повт}}}$,	$\frac{j_1}{j_{\text{повт}}}$,	$\frac{\delta j_1}{\delta j_{\text{повт}}}$,
			мкм (эмп.)	мкм (расч.)	мкм (эмп.)	мкм (расч.)	МПа/мкм (эмп.)	МПа/мкм (расч.)	%
1	7,5	0,15	$\frac{0,82}{2,29}$	$\frac{-}{2,24}$	$\frac{0,9}{0,6}$	$\frac{0,85}{-}$	$\frac{0,92}{3,70}$	$\frac{0,94}{3,89}$	$\frac{2,2}{5,2}$
2	7,5	6	$\frac{1,10}{3,26}$	$\frac{-}{3,48}$	$\frac{1,7}{1,6}$	$\frac{1,58}{-}$	$\frac{0,34}{1,71}$	$\frac{0,36}{1,73}$	$\frac{5,9}{1,2}$
3	3	0,15	$\frac{0,70}{1,63}$	$\frac{-}{1,45}$	$\frac{0,7}{0,6}$	$\frac{0,63}{-}$	$\frac{1,04}{3,36}$	$\frac{1,14}{4,00}$	$\frac{9,7}{19,1}$
4	3	6	$\frac{0,97}{2,58}$	$\frac{-}{2,25}$	$\frac{1,2}{0,9}$	$\frac{1,17}{-}$	$\frac{0,49}{1,85}$	$\frac{0,53}{2,21}$	$\frac{8,2}{19,5}$

Анализ расчетных и эмпирических значений параметров качества поверхностного слоя деталей, относительной погрешности δ расчета контактной жесткости их стыка при первом и повторных нагружениях (табл. 4), кривых контактных перемещений позволяет сделать вывод о хорошей адекватности используемых теоретических моделей, разработанных алгоритма и программы для автоматизированного технологического обеспечения контактной жесткости шлифованных поверхностей деталей машин и их стыков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. МР 42-82. Метод определения нормальной контактной жесткости неподвижных стыков. Методические рекомендации. – М.: ВНИИМАШ, 1982.
2. Бишутин, С.Г. Обеспечение требуемой совокупности параметров качества поверхностных слоев деталей при шлифовании: монография / С.Г. Бишутин. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 143 с.
3. В помощь конструктору-станкостроителю / В.И. Калинин, В.Н. Никифоров, Н.Я. Анисеев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1983. – 288 с.
4. Инженерия поверхности деталей / А.Г. Сулов [и др.]; под ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2009. – 320 с.
5. Марочник сталей и сплавов / под ред. А.С. Зубченко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2003. – 782 с.
6. Медведев, Д.М. Одноступенчатое технологическое обеспечение износостойкости цилиндрических поверхностей деталей машин при механической обработке / Д.М. Медведев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2010. – № 2. – С. 4-9.
7. Справочник инструментальщика / И.А. Ординарцев [и др.]; под общ. ред. И.А. Ординарцева. – Л.: Машиностроение, 1987. – 845 с.
8. Сулов, А.Г. Автоматизация расчета нормальной контактной жесткости стыков плоских поверхностей шлифованных деталей / А.Г. Сулов, С.Г. Бишутин, Д.М. Медведев, В.А. Хандожко // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2006. – № 2. – С. 135-139.

9. Суслов, А.Г. Научные основы технологии машиностроения / А.Г. Суслов, А.М. Дальский. – М. : Машиностроение, 2002. – 684 с.
10. Суслов, А.Г. Одноступенчатое технологическое обеспечение износостойкости цилиндрических поверхностей деталей машин / А.Г. Суслов, Д.М. Медведев // СТИН. – 2010. – № 8. – С. 22-25.
11. Суслов, А.Г. Технологическое повышение долговечности поверхностей трения деталей машин на базе энергетического подхода / А.Г. Суслов, Д.М. Медведев, А.Н. Шоев // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2011. – № 6. – С. 46-48.
12. Суслов, А.Г. Энергетический подход к технологическому обеспечению износостойкости поверхностей трения деталей машин / А.Г. Суслов, Д.М. Медведев, А.Н. Шоев // Вестник машиностроения. – 2011. – № 10. – С. 56-58.
13. Хандожко, В.А. Модернизация автоматизированной системы научных исследований контактной жесткости на основе усовершенствованной нормализованной методики испытаний / В.А. Хандожко // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2006. – № 2. – С. 145-147.
14. Хандожко, В.А. Одноступенчатое технологическое обеспечение контактной жесткости плоских поверхностей деталей машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.А. Хандожко. – Брянск, 2007. – 20 с.
15. Худобин, Л.В. Смазочно-охлаждающие жидкости при абразивно-алмазной обработке / Л.В. Худобин. – М.: Машиностроение, 1977. – 55 с.
16. Безъязычный, В.Ф. Расчетное определение технологических условий обработки, обеспечивающих заданную контактную жесткость сопрягаемых поверхностей / В.Ф. Безъязычный // Справочник. Инженерный журнал. Приложение. – 2014. - № 8. – С. 9-15.
17. Прогрессивные инструменты и технологии шлифования: коллективная монография / Под.ред. А.В. Киричека. – М.: Издательский дом СПЕКТР, 2013. – 320 с.

Материал поступил в редколлегию 17.02.15.