

03
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

Челябинский политехнический институт
имени Ленинского комсомола

На правах рукописи

С. Н. КОРЧАК

доцент, кандидат технических наук

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ
НА ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ
ШЛИФОВАНИЯ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ**

(Специальность 02.05.08 - "Технология машиностроения")

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Челябинск

1973

Работа выполнена на кафедре "Технология машиностроения" Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Л. А. ГЛЕЙЗЕР (г. Москва),
заслуженный деятель науки и техники РСФСР
доктор технических наук, профессор С. Г. РЕДЬКО (г. Саратов),
доктор технических наук, профессор Л. В. ХУДОБИН (г. Ульяновск).

Ведущее предприятие. - Челябинский тракторный завод
имени В. И. Ленина.

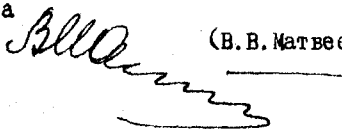
Автореферат разослан " 10 " января 1974г.

Защита диссертации состоится " 27 " февраля 1974г.,
в 15 час., на заседании Совета Челябинского политехнического
института им. Ленинского комсомола (ауд. 244).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся
темой диссертации, принять участие в заседании Совета или
прислать отзыв в 2-х экземплярах, заверенных печатью, ученому
секретарю Совета по адресу: 454044, г. Челябинск, проспект
им. В. И. Ленина, 76.

Ученый секретарь Совета института
доктор техн. наук, профессор


(В. В. Матвеев)

В В Е Д Е Н И Е

Развитие экономики нашей страны и создание материально-технической базы коммунистического общества в первую очередь определяется темпами роста производительности труда во всех отраслях народного хозяйства СССР в том числе и в машиностроении. Директивами XXIV съезда КПСС намечено увеличить в IX пятилетке производительность труда в машиностроении в I,5-I,8 раза. Однако увеличение производительности нередко приводит к снижению качества. Кроме того, на производительность влияет много различных технологических факторов и их сложное взаимодействие приводит к тому, что в заводской практике процессы обработки часто осуществляются в условиях, далеких от оптимальных. Поэтому понятны усилия многих исследователей, которые стремятся вскрыть имеющиеся резервы повышения производительности без увеличения количества оборудования и рабочей силы, главным образом, за счет выбора более оптимальных режимов и технологических условий обработки. Оптимизация обработки может производиться на базе научного управления процессом, которое основывается на математической связи физических факторов с производительностью процесса. Последнее требует по существу создание теории процесса обработки, необходимой для научного управления производительностью.

Существующая на сегодня совокупность знаний в этой области основана, главным образом, на результатах прямых экспериментов, моделирующих те или иные условия обработки, а полученные из опытных данных зависимости имеют обычно вид степенных функций, устанавливающих связь между двумя или несколькими факторами, которые предположительно оказывают влияние на рассматриваемое явление. Такие зависимости не вскрывают физических взаимосвязей, определяющих производительность процесса. Большое количество поправочных коэффициентов, предназначенных для приближения таких зависимостей к реальным условиям обработки еще больше затрудняет выявление главных факторов, физически определяющих производительность процесса.

Актуальность создания математической теории процессов обработки, базирующейся на ясной физической основе, помимо решения основной задачи - управления процессом для достижения наибольшей производительности, - диктуется также широким внедрением в промышленность вычислительной техники, как средств управления технологическими процессами обработки. Это вызывает практическую необходимость в разработке широкодиапазонных программ режимов управления для станков с ЧПУ, для станков и станочных комплексов, управляемых от ЭВМ, для автоматизации разработки режимов резания и технологических процессов с помощью ЭВМ и т.д.

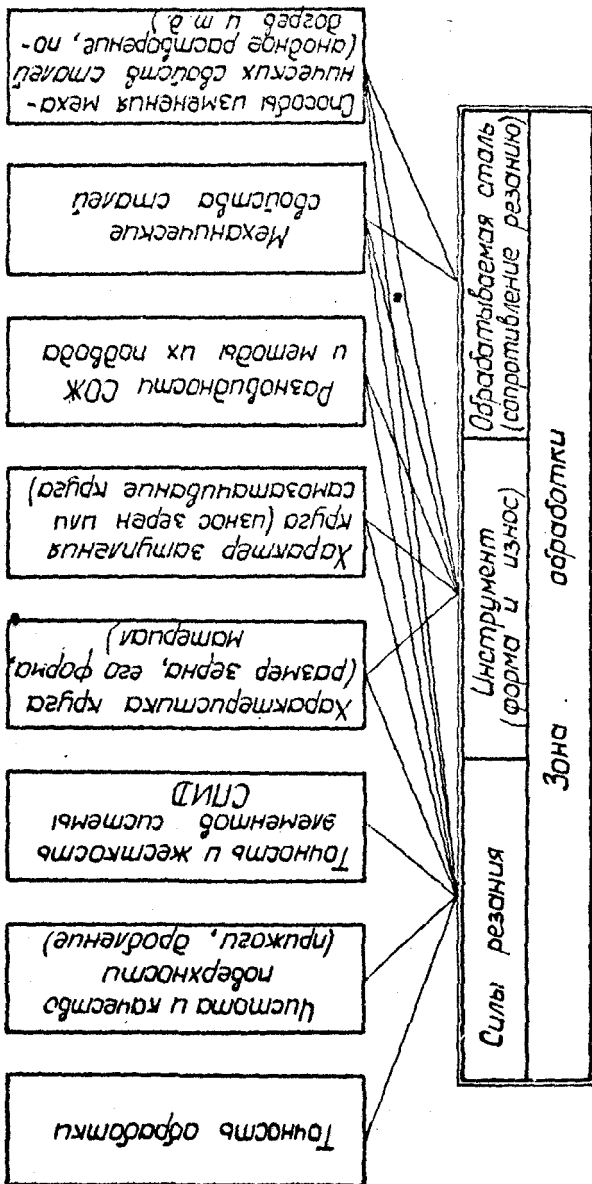
Многофакторность процессов обработки приводит к тому, что создание единой теории, схватывающей все параметры, влияющие на производительность обработки, связано с преодолением больших трудностей. Этим объясняется развитие многих отдельных теорий, используемых для управления процессами обработки: механики процесса резания металлов, адаптивного управления режимами обработки, кинематики формообразования обработанных поверхностей, теплофизики, экономической оптимизации и т.д.

Математическая формализация ряда теорий выполнялась в трудах многих советских и зарубежных ученых: Б.С. Балакшина, Н.Н. Зорева, В.А. Кривоухова, Г.И. Грановского, Т.Н. Лоладзе, В.С. Корсакова, А.Я. Малкина, А.И. Исаева, В.Ф. Боброва, В.Н. Подураева, Е.Н. Маслова, Л.А. Глеизера, А.В. Подзея, М.И. Клущина, А.М. Розенберга, А.А. Маталина, П.И. Ищерицина, С.Г. Редько, Г.В. Бокучавы, Л.В. Худобина, А.Н. Резникова, А.В. Якимова, Б.И. Костецкого, В.Т. Мещерина, М.В. Сторожева, Е.А. Попова, Г.А. Смирнова-Аляева, Мерчанта, Э. Томсена и многих других. Работами этих ученых создана теоретическая база для дальнейшего обобщения ряда закономерностей процессов обработки. Именно это обстоятельство позволило автору направить усилия на установление общих функциональных связей между производительностью процесса и технологическими факторами, действующими непосредственно в период формообразования поверхностей детали. Вывод таких зависимостей важен для любых процессов резания металлов,

но особенно существенное значение они приобретают для финишных операций обработки, где формируется готовая деталь, в частности, для операций шлифования, имеющих наибольшее распространение среди других методов механической обработки. Так, удельный вес парка шлифовальных станков составляет в машиностроении в настоящее время около 22%, в автомобильной и тракторной промышленности - 30%, а в подшипниковой доходит до 65% от общего станочного парка.

На производительность шлифования влияет большое число технологических факторов и условий обработки, основные из которых приведены на рис. I. Обычно попытки оптимизации процессов шлифования основываются на результатах отдельных экспериментов. Однако по целому ряду показателей вообще не устанавливались экспериментальные зависимости (например, по влиянию износа зерен круга на производительность), а причины существенного влияния химсостава сталей на производительность шлифования не вскрыты даже качественно. В связи с этим в нормативах режимов резания на шлифовальные работы, выпущенных различными организациями, до последнего времени был принят единый уровень режимов шлифования для обработки сталей разного химсостава. Это можно объяснить тем, что твердость и прочность сталей одного химсостава (например, закаленных и незакаленных) не оказывает влияния на производительность шлифования. На диаграмме (рис. 2а) показано изменение твердости и предела прочности ряда сталей. Из диаграммы видно, что производительность шлифования разных сталей не связана с пределом прочности и их твердостью, хотя при резании сталей лезвийным инструментом такая зависимость прослеживается. Это несоответствие привлекало внимание исследователей, однако объяснения не получило.

В то же время из заводской практики и ряда экспериментальных исследований известно, что производительность шлифования деталей одной точности и качества, но изготовленных из разных марок сталей, значительно отличается между собой. Так, конструкционные, углеродистые и легированные стали некоторых марок (близкие по твердости и прочности) отличаются по производительности между собой до 3-х раз (рис. 2а), специаль-



Производительность процесса шлифования
(режимы резания и основное время)

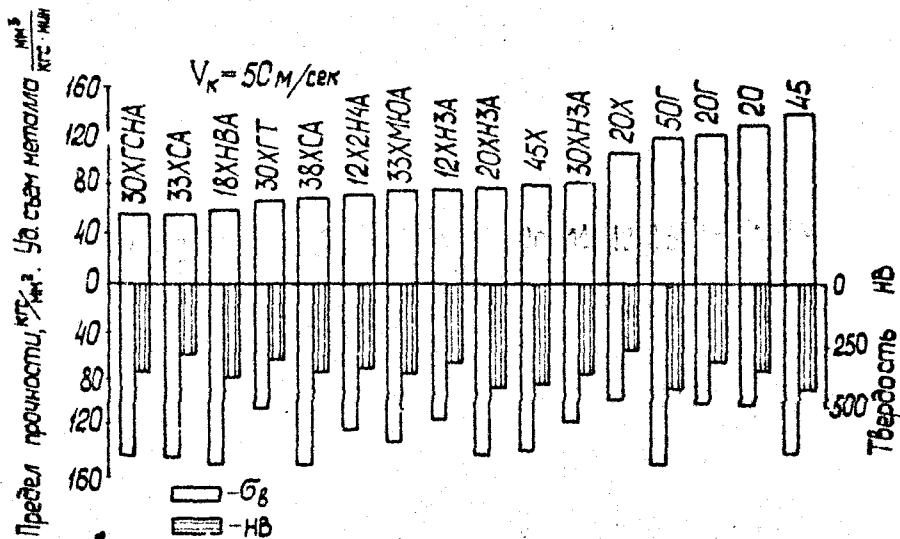
Рис. 1. Схема влияния основных технологических факторов на производительность процесса шлифования

ные стали и сплавы до 10 раз (рис. 26), а некоторые хрупкие и нержавеющей сплавы (по данным ЦНИИТМАШа) - до 15-20 раз.

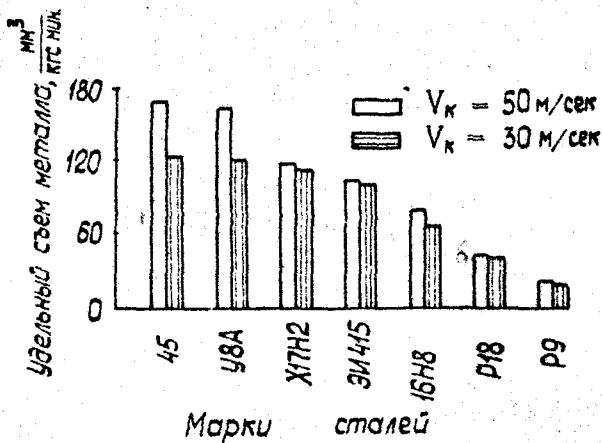
Принятый в нормативах единый уровень режимов шлифования для сталей разного химсостава обусловил значительное занижение расчетных норм основного времени при обработке большинства марок сталей. Это занижение в производственных условиях, а также ошибки в проектно-технологических разработках, связанные с неправильным определением количества оборудования, площадей и рабочей силы, приводят к значительным экономическим потерям.

В соответствии с координационным плечом нормативно-исследовательских работ по труду в промышленности (утвержденным Госкомитетом по вопросам труда и зарплаты Совмина СССР) нами в течение ряда лет разрабатывались сборники второго издания общемашиностроительных нормативов на шлифовальные работы. В процессе работы над нормативами стало очевидным, что для повышения точности проектных разработок и приближения расчетных норм к реальным условиям необходимо в первую очередь учесть химсостав разных марок сталей, который в несколько раз может изменять производительность процесса обработки.

В работах Т. П. Рекшинской, Н. А. Минкевича, Ю. А. Геллера, Н. И. Волского, Б. И. Костецкого, В. А. Шалькова, А. А. Абанова, В. А. Хрулькова, М. Харады и ряда других отмечается большая разница (до 40 раз) в производительности шлифования сталей разного химсостава. Исследователи ставят производительность в зависимость от разных причин: наличия твердых карбидов или аустенита в структуре стали или от различных сочетаний механических свойств. В работах не содержится единых точек зрения даже по поводу общих теоретических причин большой практической разницы в производительности шлифования, не говоря о количественных связях ее с какими-либо определенными свойствами сталей. Кроме того, экспериментальные данные этих работ получены при разных методиках шлифования, с оценкой производительности по разным критериям, без учета точности обработки, износа зерен кругов, при различном силовом воздействии, что делает невозможным их обобщение и использование. Изучение результатов работ показало,



а)



б)

Рис. 2. Сравнительная производительность шлифования сталей разных марок (при $P_y = \text{const}$)

что эмпиризм резко сужает возможности теоретических обобщений и управления процессом шлифования в широком практическом диапазоне режимов и технологических условий обработки, поэтому задача аналитического определения производительности шлифования не может быть решена в общем виде, если продолжать исследования только на экспериментальном уровне из-за непрерывного увеличения числа новых и изменения существующих марок сталей, а также большого многообразия реальных технологических условий шлифования, как правило, не совпадающих с условиями эксперимента.

Таким образом, решение важной для машиностроения народнохозяйственной задачи, связанной с разработкой новых общемашиностроительных нормативов режимов шлифования оказалось в зависимости от установления количественных функциональных связей между производительностью шлифования и технологическими факторами, что, по-видимому, можно отнести к числу актуальных проблем технологии машиностроения. Для решения этой проблемы в работе была сформулирована общая цель: вскрыть физическую сущность сопротивления сталей внедрению зерен круга и на основе общих законов механики аналитически установить количественные зависимости для расчетного определения изменения производительности процессов шлифования с изменением марки стали, а также других технологических факторов обработки.

Вначале были установлены общие признаки, которые объединяют многочисленные внешние технологические факторы в конечное число обобщенных параметров, физически связанных друг с другом законами механики в зоне обработки.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Процессы механической обработки — это, как известно, процессы силового воздействия инструмента на обрабатываемый металл. Величина этого воздействия определяет производительность процесса, максимальные значения которой ограничиваются в практике рядом факторов, главные из которых связаны с вели-

чиной упругих перемещений системы СПИД и другими внешними технологическими факторами, приведенными на рис. I. Работами Б.С. Балакшина, посвященных проблеме повышения производительности и точности обработки на металлорежущих станках, показано, что чаще всего предельная производительность в реальных процессах обработки ограничивается величиной сил резания, максимальные значения которых зависят, в свою очередь, от допустимых системой СПИД упругих перемещений, т.е. от требуемой точности обработки, жесткости и точности станков, точности заготовок и т.д.

Учитывая преимущественное ограничение производительности по силам резания, оценка относительной производительности процесса шлифования в дальнейшем производилась с их учетом. В экспериментах относительная производительность процесса шлифования оценивается по объемному съему металла в единицу времени на 1 кгс действующей на инструмент силы. В расчетах оценка производительности производится по толщине среза от единичного зерна при его определенном силовом нагружении. Эти величины между собой пропорциональны. Такое понятие производительности процесса позволяет определять съем металла при различных допустимых системой СПИД силах резания, обеспечивающих для конкретных условий обработки заданную точность и качество детали.

Существенное влияние на изменение производительности процесса оказывает также геометрическая форма внедряемого в металл инструмента, т.е. зерен круга для процесса шлифования и степень их затупления за период стойкости. Различная интенсивность затупления инструмента за период стойкости может существенно изменить производительность процесса обработки.

Под действием внешних сил инструмент внедряется в металл, который оказывает ему сопротивление, зависящее от его механических свойств и от формы внедряемого инструмента. Следовательно, применив положение механики о равенстве активных сил (сил резания) и реактивных сил (сил сопротивления металла), можно получить величину заглубления инструмента в металл и, придав инструменту и детали принятые в практике скорости

взаимного перемещения, перейти к расчету параметров режима резания, сечению среза и скорости резания, которые и определяют производительность процесса.

По данным Н.Н.Зорева в наиболее полной мере силы резания могут быть определены через работу пластического деформирования и трения в зоне резания.

В общем виде работа деформации A_D (по М.В.Сторожеву и Е.А.Попову) для объема металла W составит:

$$A_D = \iiint_W \sigma_i \cdot \dot{\epsilon}_i \cdot dW,$$

а в движущейся вместе с инструментом системе координат эту формулу можно представить в следующем виде

$$N = \frac{dA_D}{dt} = \iiint_W \sigma_i \cdot \dot{\epsilon}_i dW, \quad (I)$$

где N - мощность деформации;

σ_i - интенсивность напряжений в движущемся объеме деформируемого металла, которая по данным А.Г.Смирнова-Аляева в наиболее полной мере характеризует сопротивление металла пластическому течению и выражается в общем случае для плоской схемы деформации через составляющие напряжений разных направлений:

$$\sigma_i = \sqrt{3 \left(\frac{\tau_y - \tau_x}{2} \right)^2 + 3\tau_{xy}},$$

ϵ_i - интенсивность деформаций;

$\dot{\epsilon}_i$ - интенсивность скорости деформаций.

Из (I) мощность деформации для плоской схемы резания (рис.3) составит:

$$N = \sigma_i \cdot \dot{\epsilon}_i \frac{a \cdot m}{\sin \beta_1},$$

где a - толщина среза;

β_1 - угол сдвига;

m - средняя толщина зоны пластического сдвига.

Учитывая, что мощность резания может быть выражена через равнодействующую силу резания R_S и скорость резания V_K (для шлифования) как $N = R_S \cdot V_K \cos \beta$ получим равенство

$$R_s \cdot V_k \cos \beta = \sigma_l \cdot \dot{\epsilon}_l \frac{a \cdot m}{\sin \beta_1},$$

где β - угол между R_s и направлением V_k .

При

$$\dot{\epsilon}_l \approx \frac{V_c}{\sqrt{3} m} \approx \frac{V_k \cdot k}{\sqrt{3} m},$$

где скорость сдвига $V_c = V_k \cdot k$.

получим:

$$R_s \cdot V_k \cdot \cos \beta = \sigma_l \frac{V_k \cdot k}{\sqrt{3} m} \cdot \frac{a \cdot m}{\sin \beta_1}$$

и следовательно:

$$R_s = \sigma_l \cdot a \frac{k}{\sqrt{3} \cdot \cos \beta \cdot \sin \beta_1} = \sigma_l \cdot a \cdot k' \quad (2)$$

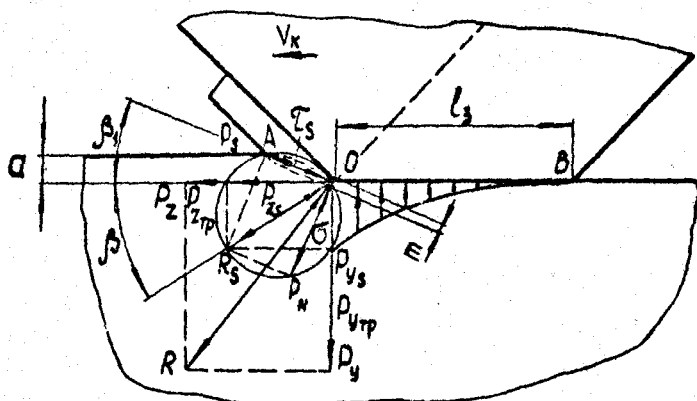


Рис. 3. Масштабная (100:1) схема среза, приближенная эпюра напряжений и составляющих сил резания для единичного зерна при шлифовании

При нарушении силового равновесия от действия внешних причин (например, колебаний припуска, износа инструмента, изме-

нения свойств материала) происходит перераспределение упругих перемещений в замкнутом силовом контуре системы СПИД, что приводит к колебаниям размера обработки, нагрузки на инструмент, изменению характера вибрации и т.д. В реальных процессах из-за действия внешних переменных факторов непрерывно происходят нарушения силового равновесия в той или иной степени и в каждый момент времени система СПИД стремится за счет перераспределения упругих перемещений восстановить это равновесие. При любом методе управления подачей на станках (ручном, механическом, автоматическом, адаптивном) для обеспечения максимальной производительности стремятся вести процесс на предельно допустимом силовом уровне, который проявляет себя при шлифовании различными нарушениями нормального хода процесса: большими вибрациями, недопустимыми деформациями в системе СПИД, осипанием круга, прижогами и т.д. Адаптивное управление обеспечивает наиболее высокую производительность и стабильное заданное качество обработки путем наибольшего приближения к предельно допустимой силе резания и компенсации колебания этой силы от непрерывно меняющихся технологических факторов.

В процессах шлифования существенным является стабилизация или управление по радиальной силе, так как получаемая точность прошлифованной детали и качество поверхности будут определяться, главным образом, величиной и колебаниями радиальной силы. Предельные значения средней величины радиальной силы (без учета ее колебаний в течение цикла обработки) будут зависеть от большого числа внешних технологических условий обработки: исходной точности заготовок, конструктивной жесткости и точности станков разных моделей, сроков их эксплуатации, требуемого класса точности и чистоты поверхности готовой детали, метода подачи круга (ручная, автоматическая) и многих других. Поэтому в последующем анализе взаимосвязи производительности шлифования с разными технологическими факторами учитываются величины предельно допустимых радиальных сил резания (хотя расчет в общем случае может производиться по силе любого направления, вызывающей ограничение производительности).

Величина радиальной силы резания с учетом уравнения (2) будет равна (рис.3):

$$P_{y_s} = R_s \cdot \sin \beta = \sigma_i \cdot a \frac{K \cdot t_{y_s} \beta}{\sqrt{3} \cdot \sin \beta_i} = K_1 \cdot \sigma_i \cdot a, \quad (3)$$

где K_1 - коэффициент, учитывающий долю напряжений, действующих в направлении силы P_{y_s} , для данной геометрии острого инструмента.

Оценивая производительность процесса шлифования по толщине среза a , искомую зависимость можно записать

$$a = \frac{P_{y_s}}{K_1 \cdot \sigma_i}. \quad (4)$$

Эта зависимость была бы справедлива, если бы инструмент сохранял во время обработки постоянную остроту. Однако на зерне в процессе работы появляется площадка затупления по задней грани, непрерывно увеличивающаяся во времени $l_3(t)$, в соответствии с теми или иными закономерностями износа, характерными для рассматриваемых условий обработки. Вместе с ростом площадки l_3 будут увеличиваться силы радиального отжатия и трения, возникающие от напряжений, наследственно попавших при движении инструмента из зоны всестороннего сжатия (на рис.3 эта зона ограничена кругом Моора) под площадку износа. Таким образом в направлении радиального отжатия инструмента будет действовать две радиальных составляющих силы:

P_{y_s} - от среза толщиной a и $P_{y_{тр}}$ - от напряжений нормальных к площадке износа l_3 . Последняя составляющая для плоской схемы резания (рис.3) может быть выражена:

$$P_{y_{тр}} = K_2 \cdot \sigma_i \cdot l_3(t),$$

где K_2 - коэффициент, учитывающий долю напряжений, действующих под площадкой износа в направлении P_y .

Общая радиальная сила составит:

$$P_y = P_{y_s} + P_{y_{тр}} = K_1 \cdot \sigma_i \cdot a + K_2 \cdot \sigma_i \cdot l_3(t).$$

При затуплении зерна круга и увеличении l_3 величина толщины среза (a) при $P_y = \text{const}$ будет уменьшаться или при $a = \text{const}$

будет увеличиваться P_y . Учитывая этот фактор, общая структурная зависимость взаимосвязи производительности процесса шлифования (выраженная через толщину среза α) с технологическими факторами приобретает вид:

$$\alpha = \frac{P_y}{K_1 G_1} - K_3 l_3(t). \quad (5)$$

Таким образом, появляется возможность осуществить количественную оценку производительности процесса (через толщину среза α) с учетом взаимодействия технологических факторов, непосредственно связанных друг с другом прямыми физическими зависимостями в зоне обработки. Таких факторов только три: сила резания, форма (геометрия) внедряемого инструмента, к которому приложена эта сила, и сопротивление сталей внедрению инструмента в условиях данного процесса обработки. Другие внешние технологические факторы обработки (например, вид охлаждения, материал инструмента и т.д.) оказывают влияние на изменение производительности процесса через изменение указанных трех факторов.

Таким образом, наложив на процесс резания реальные силовые ограничения (обеспечивающие либо требуемую точность и качество детали, либо износостойкость инструмента и пр.), можно управлять производительностью процесса обработки через изменение трех обобщенных технологических факторов, действующих в системе СПИД. Это первая теоретическая предпосылка исследования, касающаяся методики расчета производительности.

Уточним теперь физическую природу отдельных факторов, входящих в структурную формулу.

1. Из практики круглого шлифования известен порядок средних радиальных сил прижима круга к детали, который составляет 1-2 кгс на 1 см ширины круга для чистового шлифования.

2. Вероятная геометрия и характер износа зерен требует специального исследования.

3. Сопротивление сталей в условиях шлифования является параметром, который применительно к процессу шлифования вообще не изучался. А именно от правильности определения физической природы и численных величин действительного сопротивления сталей шлифованию будет зависеть точность расчетной количественной оценки производительности.

Из практики, в частности, известно, что режущая способность круга сильно меняется от скорости резания. Так, обтачивание шлифовальных кругов производится инструментом из мягкой стали на малой скорости. Однако с повышением скорости круг перестает осыпаться, а металл начинает легко сошлифовываться. При этом температура в зоне шлифования становится очень высокой.

Как отмечалось выше, твердость и предел прочности сталей не оказывают влияния на производительность шлифования. В связи с этими особенностями можно предполагать, что традиционная увязка производительности шлифования с механическими свойствами и структурой стали в исходном "холодном" состоянии (которую пытались обычно учитывать при шлифовании по аналогии с резанием лезвийным инструментом) ошибочна и не отражает в полной мере физических условий работы зерна. В противоположность этому вторую теоретическую предпосылку исследования можно сформулировать в виде следующей рабочей гипотезы, объясняющей физические причины и закономерности большой практической разницы в обрабатываемости разных сталей шлифованием.

В момент врезания очередного зерна круга температура металла в зоне контакта остается высокой в результате работы предшествующих зерен, т.е. работа зерна происходит в среде нагретого до высоких температур металла. В связи с этим, можно предполагать, что производительность шлифования находится в закономерной функциональной связи с сопротивлением пластическому деформированию сталей, нагретых до высоких температур. Без знания сил сопротивления сталей пластическому деформированию, то есть напряжений и законов их изменения, невозможна правильная количественная оценка и расчет производительности процесса обработки. Поэтому целью последующего теоретического исследования является получение расчетных зависимостей для определения относительной производительности процесса шлифования, на базе исследования физических явлений, вызывающих разное сопротивление сталей внешним силам, с учетом формы внедряемого инструмента и напряжений в зоне обработки, характерных для температуры и скорости шлифования.

Анализ взаимосвязи производительности шлифования
сталей с обобщенными технологическими факторами

Для построения расчетной физической модели процессов шлифования установим диапазон возможных значений обобщенных факторов применительно к условиям чистового и получистового круглого шлифования стальных деталей с радиальной подачей.

1. Величина радиальной силы может определяться либо с учетом одновременной работы нескольких зерен круга, действующих в зоне контакта, либо с учетом действия одного зерна (плоская схема) и удельной силы, приходящейся на 1 мм длины условной режущей кромки (реальная кромка зерна меньше 1 мм). После предварительного анализа был принят последний способ, как обеспечивающий более высокую точность расчетов. Влияние числа одновременно работающих зерен на производительность шлифования оценивалось отдельно при учете характеристики круга. Величина радиальной силы с учетом числа одновременно работающих зерен колеблется от 8 до 15 кгс на 1 мм длины условной режущей кромки зерна, что соответствует средним значениям радиальной силы от 1 до 2 кгс на один см ширины круга. Такие нагрузки характерны для режимов чистового и получистового шлифования стальных деталей 1-4 классов точности и 7-5 классов чистоты поверхности.

2. Для определения геометрии и величины затупления зерен, а также их числа в зоне контакта выполнен анализ большого цифрового материала ряда исследований. Кроме того, по экспериментальным данным микроскопического исследования рабочей поверхности круга, выполненного нами, были определены величины затупления зерен круга и построены среднестатистические масштабные модели-схемы механизма взаимодействия совокупности зерен круга с обрабатываемой поверхностью при круглом врезном шлифовании (рис. 4). По этим данным сделаны следующие выводы:

а) наиболее вероятная форма режущей части реального зерна круга (зернистости 25-50) после непродолжительной работы не сфероидальная (как принималось до сих пор в исследованиях), а плоская или небольшой кривизны. Затупление зерен для условий

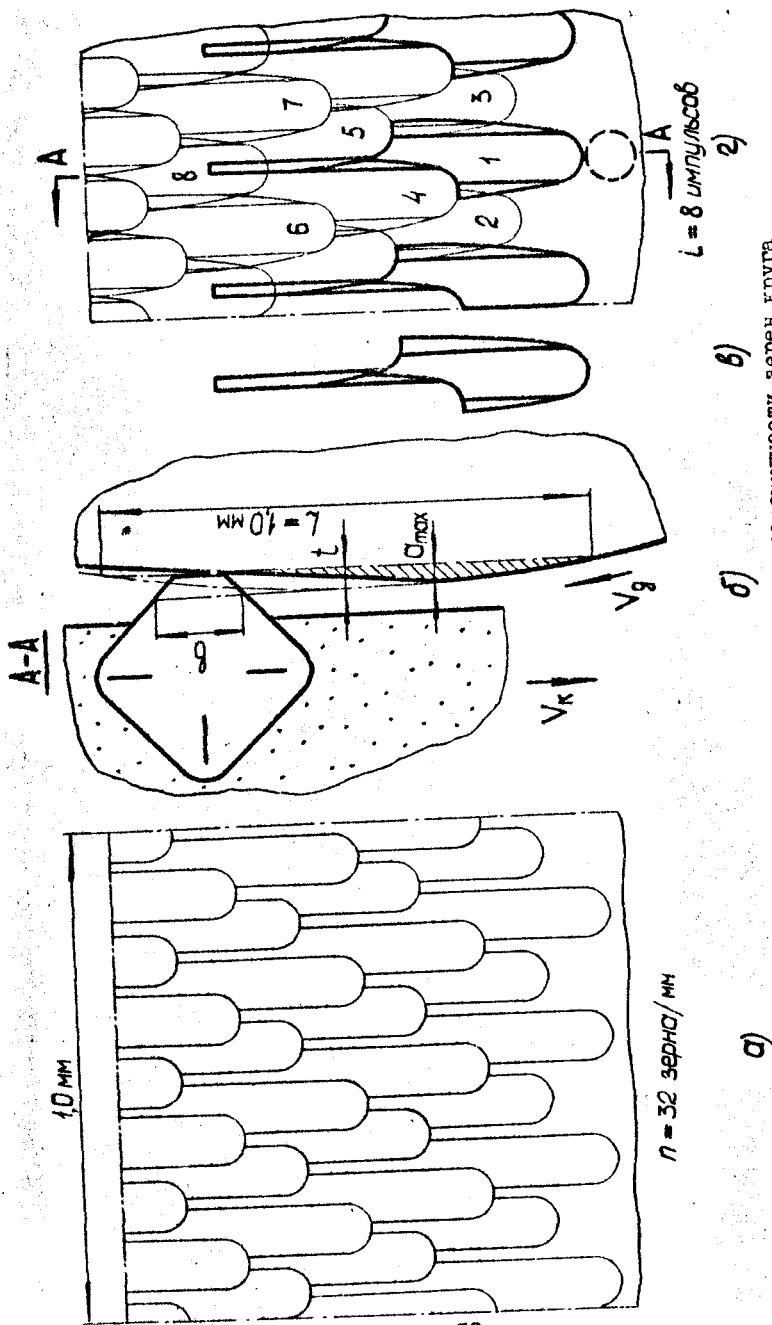


Рис. 4. Идеализованная масштабная схема взаимодействия совокупности зерен круга с деталями при $P = 2 \text{ кгс/см}$:
 а) теоретическое наложение следов расчетного количества вершин зерен на площадь контакта; б) схема продольного сечения среза; в) вид в плане в отдельных срезах; г) наложение рисок в зоне контакта

чистового и получистового шлифования и пятнадцатимиллиметровой стойкости круга (работающего без существенного самозатачивания) колеблется около 0,1 мм в поперечном сечении площадок неправильной формы;

б) большие перекрытия рисками друг друга по длине и ширине обуславливают периодическое тепловое воздействие на любой участок обрабатываемой поверхности в зоне контакта. Для исследуемого диапазона условий шлифования на каждый участок обрабатываемой поверхности действует не менее 8 тепловых источников-зерен (в среднем от 8 до 20).

3. Для определения критерия сопротивления сталей шлифованию следует, очевидно, вновь обратиться к известным физическим закономерностям механики, в частности, теории пластичности.

Внешний вид шлифовочных стружек свидетельствует о том, что шлифование является процессом пластического деформирования металла. Работы последних лет в области теории пластичности свидетельствуют, что основные физические закономерности этой теории применимы к любому виду сложнапряженного состояния деформируемого металла с той или иной степенью точности.

Теория больших пластических деформаций для оценки сложного напряженного состояния использует обобщенный показатель — интенсивность напряжений. Этой величиной можно охарактеризовать напряженное состояние всего объема металла, воспринимающего внешнее силовое воздействие, а не только зоны сдвига, которая традиционно рассматривается при анализе динамики процессов резания металлов. Основной физической закон больших пластических деформаций, к которым относятся и процессы резания металлов, определяет величину напряжений в зависимости от степени и скорости деформации, а также температуры деформируемого металла. В процессах резания и шлифования скорость деформации металла на 6-10 порядков превышает скорость деформации стандартных механических испытаний. Экспериментальные данные показывают весьма существенное влияние скорости деформации на изменение напряжений в сталях особенно при высоких температурах их нагрева. Как известно, скорость деформации обобщает в себе влияние целого комплекса технологических условий обработки:

скорости резания, геометрии инструмента (переднего угла), свойств материала (т.е. расположение и величину зоны сдвига, степень деформации) и т.д. Поэтому критерием сопротивления сталей пластическому деформированию в исследовании в соответствии с известным законом теории пластичности принята величина, близкая к средней интенсивности напряжений в температурно-скоростном интервале деформаций, кристующих процессу шлифования, а не данные стандартных механических испытаний образцов (например, σ_b или HRC).

Для приближенного определения средней величины интенсивности напряжений и получения расчетной зависимости производительности шлифования был выполнен теоретический анализ напряженного состояния в зоне резания единичным зерном круга. В процессе выполнения этого анализа и проведения ряда вспомогательных экспериментов были получены следующие данные.

а) Исследование фотографий шлифовочных стружек показало, что они представляют собой сравнительно длинные, но тонкие и узкие ленточки-полоски. Такой же вид шлифовочных стружек приведен во многих исследованиях. Однако при экспериментальном моделировании процесса шлифования резанием единичным зерном сталей при разных температурах были получены резко различные по характеру и виду стружки. При резании образцов сталей, нагретых до 700°C , были получены стружки в виде нескольких тонких и длинных полос от единичного реза с коэффициентом усадки, близким к I. Эти стружки совпадают по виду со шлифовочными. Резание единичным зерном образцов сталей при 20°C дает единичную короткую толстую стружку с коэффициентом усадки в пределах 4-5, совершенно не похожую на шлифовочную. Эти данные экспериментально подтверждают, что, во-первых, большинство зерен круга работу резания выполняют в среде разогретого в зоне контакта слоя металла, и, во-вторых, свидетельствуют о том, что моделирование процесса шлифования резанием холодных сталей (к которому до сих пор широко обращались исследователи) неточно отражает тепловые и динамические нагрузки, характерные для шлифования.

б) На основании теоретического анализа и использования экспериментальных данных по резанию нагретых сталей единичным

зерном рассчитаны скорости деформации, которые для разных условий шлифования могут изменяться от 10^6 до 10^7 сек⁻¹, что на 10 порядков отличается от скоростей стандартных механических испытаний.

в) Установлено, что порядок статических прочностей в холодном состоянии не совпадает с их порядком в нагретом состоянии при высоких скоростях деформации. В связи с этим разработана методика, объединяющая способы, предложенные Г.А.Смирновым-Аляевым и Л.Д.Соколовым, которая обеспечивает возможность приближенного определения средней величины интенсивности напряжений при разных скоростях деформации и температурах по результатам стандартных механических испытаний образцов на разрыв (по этой методике были получены зависимости $\sigma_{\dot{\epsilon}_t} - U^\circ$ для разных сталеи, рис.8).

г) Анализ эпюры напряжений вдоль линии контакта зерна с деталью (рис.3), в котором были учтены напряжения под площадкой износа зерна, позволил рассчитать величины сил резания и сил трения и их зависимость от толщины среза (α), износа зерен круга (l_3) и механических свойств стали ($\sigma_{\dot{\epsilon}_t, U^\circ}$):

$$P_y = P_{y_s} + P_{y_{тр}} = \left(\frac{\sqrt{3,25} \cdot \sin \beta \cdot \alpha}{\sqrt{3} \cdot \sin \beta_1} + \frac{0,5}{\sqrt{3}} l_3 \right) \sigma_{\dot{\epsilon}_t, U^\circ} \quad (6)$$

$$P_z = P_{z_s} + P_{z_{тр}} = \left(\frac{\sqrt{3,25} \cdot \cos \beta \cdot \alpha}{\sqrt{3} \cdot \sin \beta_1} - \frac{0,5}{\sqrt{3}} l_3 \mu \right) \sigma_{\dot{\epsilon}_t, U^\circ} \quad (7)$$

где β_1 - угол сдвига;

β - угол между равнодействующей силой резания и направлением скорости резания;

μ - коэффициент трения площадки износа зерна о металл.

д) На основании использования предпосылки об определяющей связи точности обработки с упругими деформациями системы СПИД и радиальной силой получена функциональная зависимость производительности шлифования (толщины среза α) от механических свойств сталеи (при температуре и скорости деформации шлифова-

ния), от величины радиальной силы и от степени затупления зерен круга:

$$a = \frac{\sqrt{3} \cdot \sin \beta_1 \cdot P_y}{\sqrt{3,25} \cdot \sin \beta \cdot \sigma_{\text{н.н.у}}} - \frac{0,5 \cdot \sin \beta_1}{\sqrt{3,25} \cdot \sin \beta} \cdot l_3. \quad (8)$$

Значения угла $\beta_1 \approx 22^\circ$ были определены экспериментально по величине продольной усадки шлифовочной стружки (статистическая обработка размеров шлифовочных стружек дала коэффициент усадки равный 1,35), а значения угла $\beta \approx 34^\circ$ найдены путем приближенного определения и сопоставления средних величин касательных (τ_s) и нормальных (σ) напряжений:

$$\tau_s = \frac{\sigma_{\text{н.н.у}}}{\sqrt{3}}; \quad \sigma = \frac{2 \cdot \sigma_{\text{н.н.у}}}{2\sqrt{3}}; \quad \frac{\sigma}{\tau_s} \approx 1,5. \quad (9)$$

С учетом полученных значений расчетная формула теоретической производительности шлифования приобретает вид:

$$a = 1,445 \frac{P_y}{\sigma_{\text{н.н.у}}} - 0,416 l_3. \quad (10)$$

По этой формуле были рассчитаны теоретические съемы (рис. 5) для различных технологических условий шлифования, выраженных через изменение обобщенных технологических факторов (которые варьируются на графиках в предполагаемом диапазоне).

Номограмма (рис. 6) иллюстрирует изменение производительности не только от свойств шлифуемого металла (разные напряжения - разные марки сталей), но и от степени затупления зерен круга (т.е. времени его работы без правки) и изменения внешней радиальной силы, те или иные предельные значения которой могут быть допущены в зависимости от требуемой точности и чистоты обработки, точности заготовки, а также состояния других элементов системы СПИД.

Таким образом, полученная зависимость и найденная по ней теоретическая производительность процесса шлифования (рис. 6) аналитически решают задачу по расчету относительной производительности шлифования сталей разных марок в различных технологических условиях обработки. Однако для выполнения расчетов

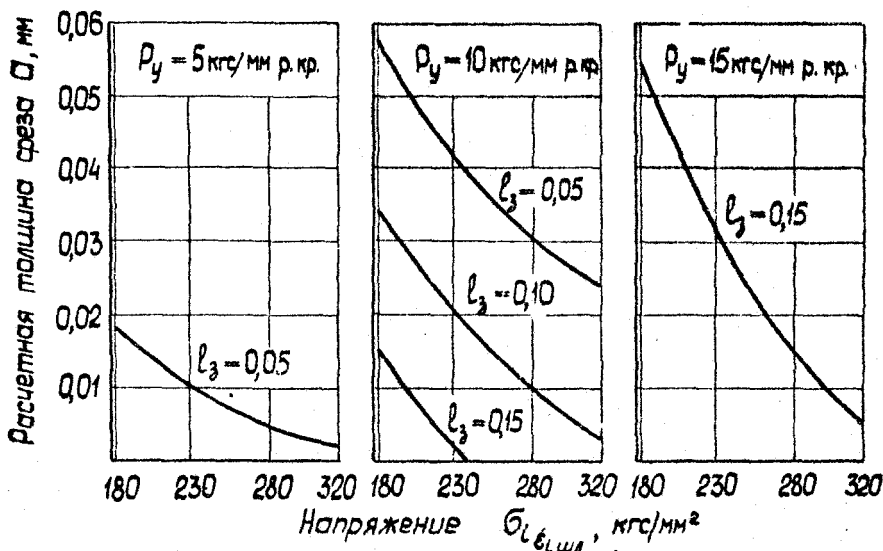


Рис. 5. Изменение расчетной относительной производительности шлифования с изменением технологических обобщенных факторов: радиальных сил резания, сопротивления сталей шлифованию (напряжений) и степени затупления зерен круга

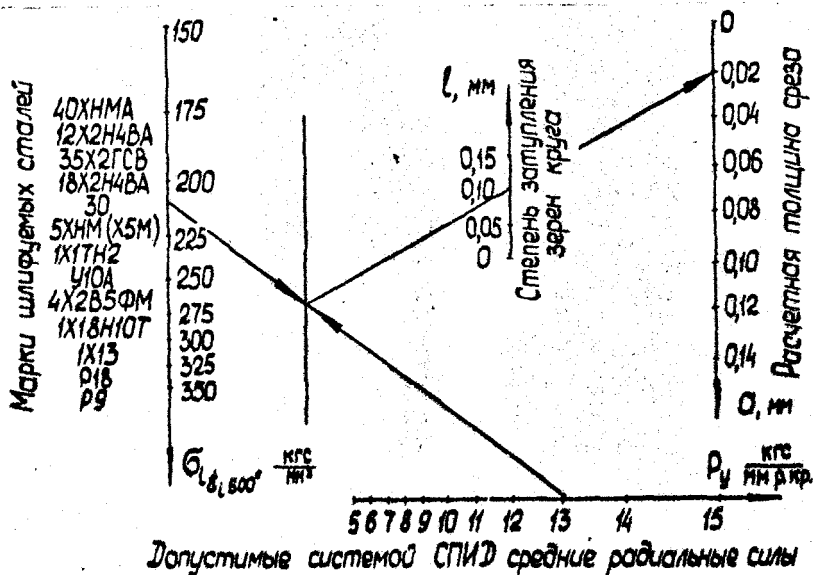


Рис. 6. Номограмма изменения расчетной производительности шлифования

по обрабатываемости разных сталей шлифованием необходимо найти температуру срезаемых слоев для последующего определения значений $\sigma_{L, U}$ для каждой марки стали.

Анализ температурного поля поверхностных
слоев детали в зоне шлифования

Рабочая гипотеза исследования предполагает, что зерна круга производят работу пластического деформирования и трения в тонком поверхностном слое, в котором к моменту подхода очередного зерна круга сохраняется достаточно высокая температура от действия ранее работавших зерен. Несмотря на большое количество работ, посвященных тепловым расчетам при шлифовании, воспользоваться их результатами для решения поставленной задачи оказалось невозможным. В работах, учитывавших тепловыделение от суммарного действия отдельных зерен, производилось либо усреднение температур по геометрической (условной) площади контакта, либо принималось бесконечное количество источников, т.е. рассматривался установившийся режим. Как показали расчеты, при круглом шлифовании из-за малой дуги контакта (1-1,2 мм) температурный режим не успевает стабилизироваться (рис.9). Кроме того, в работах вообще не определялись температуры, до которых успевают остыть срезаемые слои металла к моменту подхода очередного зерна круга.

Для оценки температурного поля зоны шлифования потребовалось построение графиков в координатах "температура (U°) - время (T)" для различных условий шлифования и для разной глубины от поверхности детали и определения для этих условий температуры металла, подвергавшегося пластическому деформированию при шлифовании. По оси абсцисс откладывается время прохождения элементарным участком поверхности детали длины дуги контакта ее с кругом. За это время участок поверхности подвергается воздействию ряда тепловых импульсов-зерен, число которых может колебаться в значительных пределах в зависимости от зернистости круга и условий шлифования, а следовательно, будет изменяться

и температура поверхностных слоев металла, срезаемых зернами круга.

В системе координат, связанной с деталью, процесс теплопередачи от воздействия движущихся источников-зерен круга может быть описан следующим уравнением (II) с дополнительными условиями (I2-I4):

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad \left\{ \begin{array}{l} 0 < x < \infty \\ -\infty < y < \infty \\ 0 < t < \infty \end{array} \right\} \quad (II)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}(0, y, t) = -\frac{P(y, t)}{\lambda}; \quad (I2)$$

$$u(x, y, 0) = \varphi(x, y). \quad (I3)$$

При этом ось Y направлена по границе, а ось X вглубь детали. При постановке задачи сделаны допущения:

1) кривизна детали (цилиндра) не учитывается;
 2) теплоизоляция границ (т.е. отвод тепла в стружку, зерно круга и т.д.) учитывается за счет изменения интенсивности источника тепла;

3) источник движется по границе; интенсивность (плотность) его $P(y, t)$ есть функция точки плоскости YT (рис.7):

$$P(y, t) = \begin{cases} q(y, t) & \text{внутри заштрихованных} \\ & \text{областей (рис.7).} \\ 0 & \text{вне их.} \end{cases} \quad (I4)$$

Интегральное решение задачи (II-I4) осуществлено с использованием функции Грина. Схема совокупного действия тепловых источников-зерен в координатах T (время) - Y (длина зоны контакта в направлении движения источников) приведена на рис.7.

Интегрирование производилось по всем заштрихованным областям (где $P \neq 0$) для любого момента времени, например, ниже линии $t = t'_1$ или линии $t = t'_2$, т.е. с учетом любого числа действующих в разное время тепловых источников.

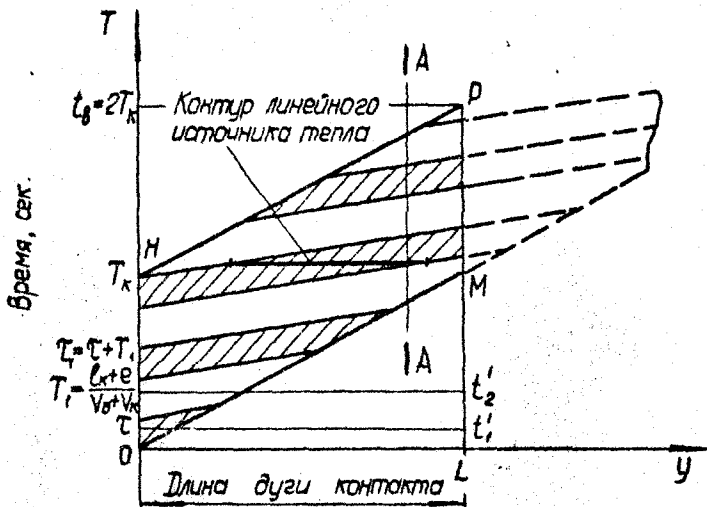


Рис. 7. Схема совокупного действия тепловых источников-зерен круга в координатах "время-длина зоны контакта детали с кругом"

При начальном условии $U_0 = \text{const}$ интегральное решение задачи (II) приобретает вид

$$U(x, y, t) = U_0 + \frac{2}{c\rho} \int_0^t dt' \int_{\Sigma D_i} \frac{q(y', t')}{4\pi x(t-t')} \cdot e^{-\frac{(y-y')^2 + x^2}{4x(t-t')}} dy', \quad (15)$$

где D_i - заштрихованные области, лежащие ниже любой прямой t .

Если интересующая нас точка в теле детали попадет в заштрихованную зону (рис. 7), то есть в зону действия теплового источника $P = q(y, t)$, то происходит нагревание, и температура рассматриваемой точки повышается. Если точка оказывается вне действия источника $P(y, t) = 0$, то происходит процесс остывания. Интегральное решение (15) в работе развито до объемной задачи.

Приведенная постановка задачи о распределении температур в зоне шлифования является попыткой аналитически описать температурное поле как результат совместного действия многих тепловых источников конечных размеров, распределенных в пространстве и времени.

Масштабные соотношения координат нагрева тонких поверхностных слоев в зоне контакта позволяют существенно упростить задачу. Реальные размеры источника тепла (площадки затупления зерен) имеет размеры около 0,1 мм, а среднестатистическая толщина среза от одного зерна составляет примерно 0,005 мм, то есть в 20 раз меньше. Это позволило (для решения локальной задачи прогрева тонких поверхностных слоев детали) свести задачу до одномерной.

В одномерном случае интегрирование ведется по любой прямой, параллельной оси T (рис.7), например, по $y = 0$. Используя введенные Хартри функции, можно из интегрального решения одномерной задачи получить

$$\text{для: } 0 < t < \tau, \quad u(x,t) = u_0 + \frac{2q}{\sqrt{\lambda c \rho}} \sqrt{t} \operatorname{ierfc} \frac{x}{\sqrt{4\lambda c t}}, \quad (I6)$$

$$\tau < t < t_1, \quad u(x,t) = u_0 + \frac{2q}{\sqrt{\lambda c \rho}} \left(\sqrt{t} \operatorname{ierfc} \frac{x}{\sqrt{4\lambda c t}} - \sqrt{t-\tau} \operatorname{ierfc} \frac{x}{\sqrt{4\lambda c (t-\tau)}} \right), \quad (I7)$$

где $q = 0,41 V \cdot G_{i \delta t} u_0$ - средняя величина интенсивности плоского источника тепла (зерна круга), определенная без учета бокового трения зерна о металл, стружки по передней грани зерна и тепловыделения в зоне гидростатического сжатия.

Таким образом, выражение (I6) описывает нагрев металла от воздействия первого импульса, а (I7) - остывание после ухода первого зерна-источника. По мере прохождения через выбранное сечение каждого последующего источника в выражение $u(x,t)$ добавляется лишь новое слагаемое, структурно совпадающее с (I7). Используя единичную функцию Хевисайда $H(t)$, можно построить аналитическое выражение $u(x,t)$ для n источников, справедливое в любой момент времени

$$U(x,t) = U_0 - \frac{2q}{\sqrt{\lambda c p}} \sum_{k=0}^n \sqrt{t - T_k} \cdot \operatorname{ierfc} \frac{x}{\sqrt{4\lambda(t - T_k)}} H(t - T_k) - \sqrt{t - \tau - T_k} \operatorname{ierfc} \frac{x}{\sqrt{4\lambda(t - \tau - T_k)}} H(t - \tau - T_k). \quad (18)$$

Вводя безразмерный критерий

$$\delta_i^j = \frac{x}{\sqrt{4\lambda(t_i - t_j)}}$$

и характеристическую функцию

$$\Pi(\delta) = \frac{\operatorname{ierfc} \delta}{\delta}$$

решение (18) можно записать в более удобной для реализации на ЭВМ (с учетом изменения λ и c от температуры) форме

$$U(x, t_i) = U_0 + \frac{qx}{\lambda} \left[\sum_{j=0}^{\lfloor \frac{i-1}{4} \rfloor} \Pi(\delta_i^{4j}) - \sum_{j=0}^{\lfloor \frac{i-2}{4} \rfloor} \Pi(\delta_i^{4j+1}) \right], \quad (19)$$

где $\lfloor \frac{i-1}{4} \rfloor$ — целая часть числа $\frac{i-1}{4}$.

Характеристическая функция $\Pi(\delta)$ значительно упростила составление алгоритма для программирования расчета. В связи с сильным влиянием температуры на изменение теплофизических характеристик и сопротивления сталей был составлен алгоритм решения нелинейной задачи, учитывающий зависимость λ , c и q от температуры, который был реализован на ЭВМ.

Конечные формулы описывают температуру в любой точке глубины поверхностного слоя в любое время (в пределах зоны контакта) с учетом непрерывно меняющейся остаточной температуры, "наследственно" полученной от действия любого количества ранее работавших зерен. Новая методика учета в уравнениях теплопроводности непрерывно изменяющихся во времени температур и зависимостей $\lambda(u)$, $c(u)$, $q(u)$ открывает большие возможности для расчета нестационарных тепловых полей, образованных совокупным действием многих подвижных тепловых источников.

Результаты теоретического и экспериментально-о
исследования производительности шлифования
разных сталей

Для проверки теоретических положений исследований, изложенных выше, и получения численных значений величин напряжений и температур, необходимых для расчета относительной производительности шлифования разных марок сталей, был выполнен комплекс конкретных расчетов и экспериментов.

Были испытаны на разрыв свыше 1000 образцов 16-ти марок сталей (марки сталей приведены на рис. II) при температурах от 20° до 1200° . Диаграммы разрывных испытаний были обработаны по методике Г.А.Смирнова-Аляева и для каждой марки стали и температуры были определены приближенные значения интенсивности напряжений в момент, предшествующий разрыву образцов, то есть при максимальных значениях степени деформации образцов. Затем, с использованием экспериментальных зависимостей Л.Д.Соколова, были рассчитаны значения интенсивности напряжений для разных марок сталей и температур, соответствующие скорости деформации при шлифовании (порядка 10^7 сек^{-1}).

В результате экспериментально-расчетным методом были установлены численные значения зависимости $\sigma_{L_{\text{лиш}}} - U^{\circ}$ для 16-ти марок сталей. Графическое изображение одной из таких зависимостей (для ст.30ХГСА) приведено на рис.8.

Для определения температур, до которых успевают остыть срезаемые поверхностные слои к моменту подхода к ним очередного зерна круга (т.к. именно при этих температурах должны быть определены напряжения, характеризующие производительность шлифования тех или иных сталей), был выполнен на ЭВМ ("Минск-22") расчет температурных полей в поверхностных слоях детали в зоне контакта с кругом для разных марок сталей.

При расчете было установлено, что из-за резких перепадов температур во времени допущение в качестве постоянных (не зависящих от температуры) величин теплофизических констант (C - теплоемкости и λ - теплопроводности) и напряжений приводит к существенным ошибкам в расчетных температурах

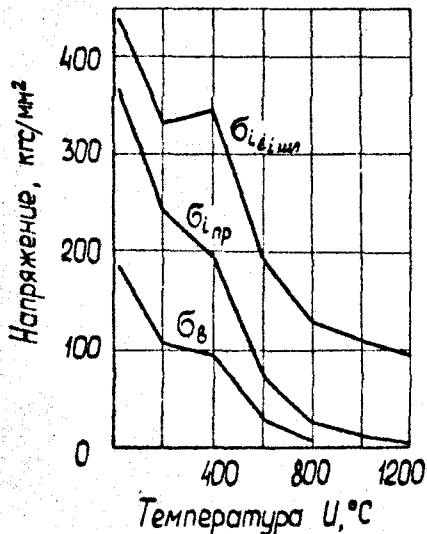


Рис.8. Влияние температуры на изменение величины временного сопротивления σ_b и интенсивности напряжений при скорости деформации шлифованием $\sigma_{b_i_{мл}}$ для ст. 30XГСНА ($\sigma_{b_{пр}}$ - интенсивность напряжений без учета влияния скорости деформации при шлифовании)

(на 25-30%). Поэтому была реализована связь между температурой и значениями теплофизических констант и напряжений путем введения в программу ЭВМ поправок на нелинейность при расчете линейного уравнения теплопроводности. Это было достигнуто путем использования в программе ЭВМ кусочно-постоянных функций, полученных путем аппроксимации экспериментальных зависимостей $\epsilon(U), \lambda(U)$ формулами вида

$$\begin{cases} \epsilon = 0,1436 \cdot 10^{-4} \cdot U^{1,5814} + 0,11 & (0 \leq U \leq 800^\circ) \\ \epsilon = 6,237 \cdot 10^{-7} \cdot U^{-3,4505} + 0,16 & (U > 800^\circ) \end{cases} \left[\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \right] \quad (20)$$

$$\lambda = 0,1483(U-50)e^{0,423 \cdot 10^{-4}(U+50)} + 23 \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}} \right]. \quad (21)$$

$$\sigma_{i \text{ в } \text{шл}}(u_{10A}) = 360e^{-0,128 \cdot 10^{-4}(u-400)^2} + 250e^{-0,5 \cdot 10^{-2}u} + 130e^{-0,001 \cdot 10^{-7}(u-1000)^4} \left[\frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2} \right]. \quad (22)$$

Поскольку число зерен круга, участвующих в работе "друг за другом" на длине дуги контакта в зависимости от характеристики круга может колебаться в значительных пределах, расчет производился в нескольких вариантах для разного числа импульсов-зерен, действующих на участок поверхности детали от момента входа до выхода из контакта с кругом. На рис.9 в качестве примера приведен график температурного поля, действию которого подвергается участок поверхности детали из стали 30ХГСНА (на глубинах 2, 5 и 10 мкм) за время прохождения дуги контакта при 12 зернах-импульсах (расчетные колебания 8+20 импульсов). Из графика следует, что максимальные температуры могут достигать температур плавления^{*}, а минимальные (к моменту подхода очередного зерна) колеблются от 200° (на входе металла в зону контакта) до 800° (на выходе из зоны контакта), имея среднее значение по всей дуге контакта около 500°. Аналогичные графики были получены для семи марок сталей, представителей разных структурных классов.

Для оценки обрабатываемости сталей шлифованием целесообразно рассмотреть среднюю температуру по дуге контакта (в каждый момент времени), которая будет определять среднее сопротивление стали шлифованию. На рис.10 приведена постоянная составляющая температурного поля на дуге контакта круга с деталью, на которую накладываются быстропеременяющиеся (со скоростью круга) высокотемпературные пики (температура под зерном).

* Для слоя толщиной до 2 мкм расчетные температуры превысили температуру плавления (пунктир рис.9), что вряд ли физически возможно и что является следствием одного из допущений методики расчета, не учитывавшей возможные фазовые изменения металла при нагреве. Для учета этих изменений и скрытой теплоты плавления в процессе распространения тепла при температурах, близких к плавлению, необходимо ставить для уравнения теплопроводности задачу Стефана.

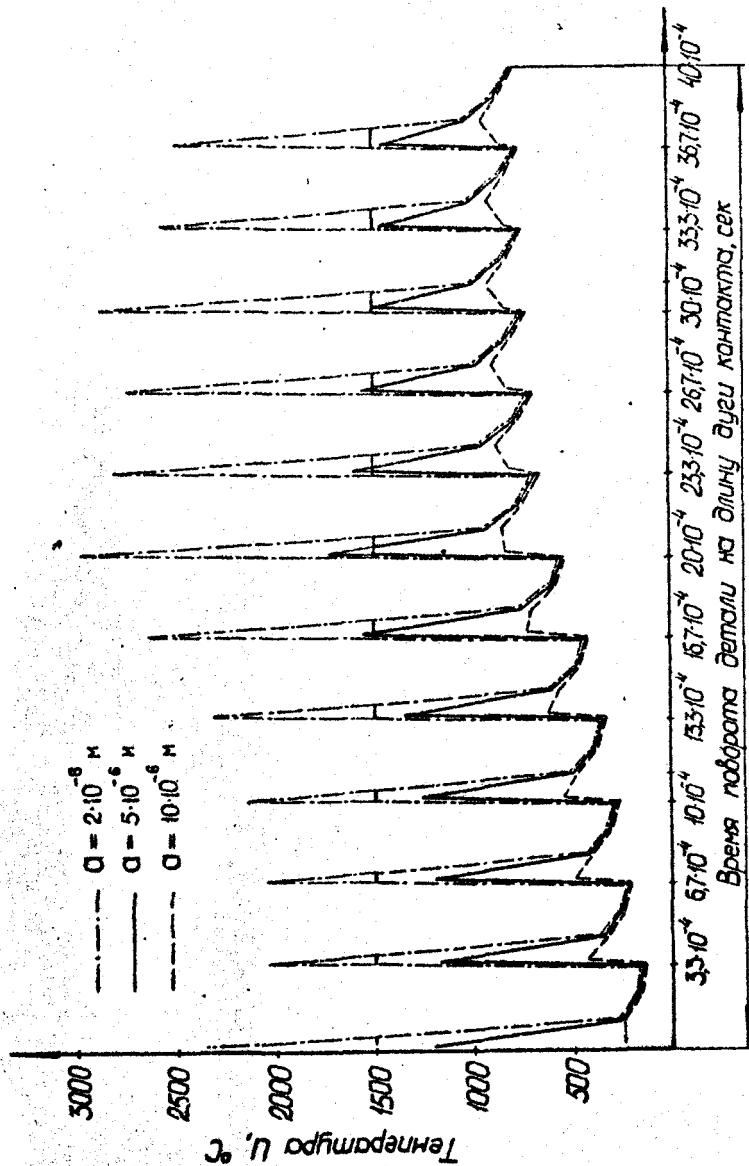


Рис. 9. Изменение температуры в стали ЭХИСНА на различной глубине (а) от поверхности за время прохода участка поверхности длины дуги контакта

Эта кривая температур остывания получена расчетом по формуле

$$U_{ост}(x, mT) = U_0 + \sqrt{\frac{\tau \alpha}{\pi \lambda c \rho}} \sum_{k=1}^m \frac{q(U_{m-k})}{\sqrt{k}} \left(1 - \frac{\delta^2}{k}\right). \quad (23)$$

В полученных решениях принята усредненная интенсивность источника

$$q = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} q(t) dt.$$

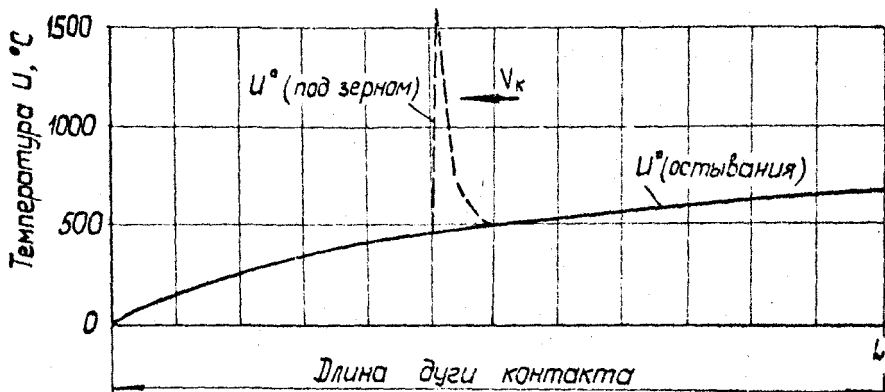


Рис. 10. Мгновенная эпюра температур на дуге контакта

Численный анализ показал, что перераспределение интенсивности $q(t)$ в интервале $[0, \tau]$ даже в случае $\max q(t) = 10q$ (при сохранении постоянным общего количества тепла, выделенного за время τ) практически не сказывается на величинах остаточных температур, поскольку время остывания имеет порядок 100τ . Таким образом, для оценки температур остывания усреднение интенсивности источника (сделанное при расчетах) не повлияло на расчетные температуры остывания, от которых зависит обрабатываемость сталей шлифованием.

Полученная зависимость (23) позволяет выявить еще одну важную особенность температурного поля зоны шлифования.

На уровень температур остывания решающее влияние оказывает зависимость $q(U)$. Характерной особенностью температур остывания является их относительная устойчивость при изменении доли тепла, отводимого в деталь. Так, если доля тепла, отводимого в деталь, при резании единичным зерном уменьшится, то последующее зерно будет работать в среде более "холодного" и, следовательно, более прочного металла, а это приведет к возрастанию общего тепловыделения и автоматическому повышению температуры металла, срезаемого последующими зернами. Расчеты показали, что уменьшение доли тепла, поступающего в деталь, даже на 30% снижает среднюю температуру остывания в зоне шлифования не более, чем на 10%. Таким образом, неточности в определении количества тепла, отводимого в деталь, не могут существенно повлиять на изменение температур остывания, определяющих обрабатываемость сталей шлифованием.

По данным расчетов было установлено, что температура поверхностных слоев разных марок сталей к моменту подхода очередного зерна плавно нарастает по линии дуги контакта, имея средние значения от 500° до 800° . Следовательно, основная качественная предпосылка исследования о преимущественной работе абразивных зерен круга в среде нагретого до высоких температур металла подтвердилась расчетом. При этих температурах были определены интенсивности напряжений ($\sigma_{\text{г}, 600^{\circ}}$), характеризующие сопротивление разных сталей шлифованию. По этим данным и выведенной расчетной зависимости подсчитана относительная теоретическая производительность шлифования 16-ти марок сталей в разных условиях силового нагружения и износа зерен круга. Эти данные для $P_y = 10$ кгс на 1 мм режущей кромки и $l_z = 0,1$ мм приведены на диаграмме (рис. II).

Экспериментальная проверка теории и использование результатов исследования в промышленности

На круглошлифовальном станке, оснащенном специальной установкой для шлифования с постоянным радиальным прижимом образца к кругу, т.е. для тех же условий стабилизации средних значений

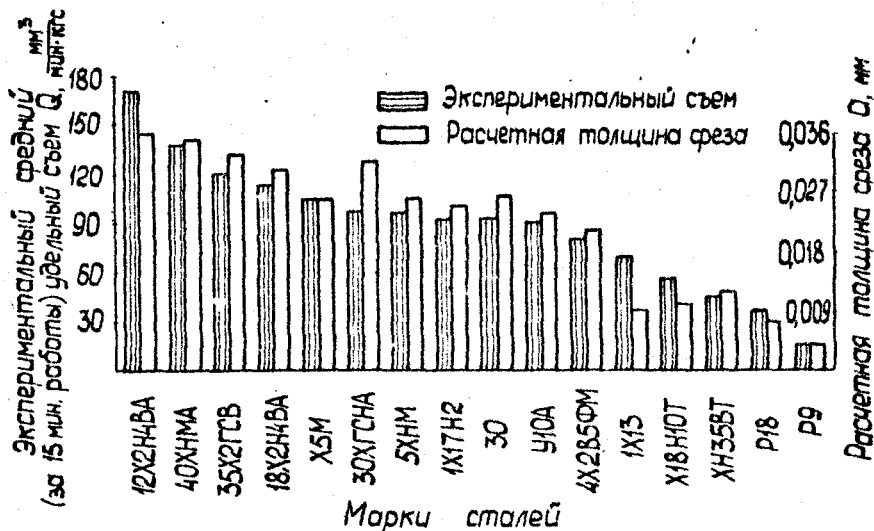


Рис. II. Сравнение экспериментальной и расчетной относительной производительности шлифования разных сталей

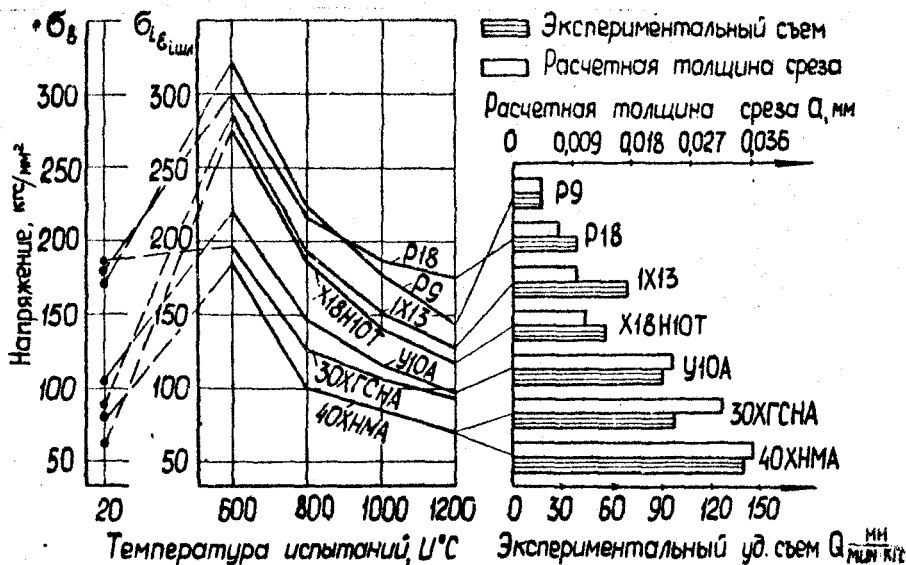


Рис. 12. Сравнение предела прочности разных сталей $\sigma_{0,2}$ и интенсивности напряжений $\sigma_{в,шл}$ (при скорости деформации и температуре шлифования) с производительностью шлифования (экспериментальной Q и расчетной A)

радиальной силы (не считая ее колебаний от обiena заготовки, круга и т.д.), для которых выведена расчетная формула, получены экспериментальные данные по относительной производительности шлифования 22-х марок сталей, включая 16 марок, для которых производился расчет. Результаты экспериментов показали их удовлетворительное совпадение с расчетной производительностью (рис. II). Экспериментальная и расчетная производительность изменяется до 10 раз для разных марок сталей. Экспериментально подтверждены также расчетные результаты по степени количественного влияния на производительность шлифования величины радиальной силы и величины износа зерен круга.

На рис. 12 приведены для ряда сталей данные по сравнению предела прочности σ_{B20} (при температуре 20°) и интенсивности напряжений $\sigma_{i_{шл}}$ (в диапазоне скоростей деформации и температур, характерных для шлифования) с производительностью шлифования тех же сталей (экспериментальной Q и расчетной A). Из графика следует, что механические свойства сталей в холодном состоянии не определяют производительность шлифования их.

Полученные расчетные и экспериментальные данные использованы при разработке двух сборников новых общемашиностроительных нормативов режимов шлифования и норм основного времени [19, 21]. В нормативах впервые учтено влияние на производительность шлифования до десяти новых технологических факторов, часть из которых приведена в табл. I (для разных работ - разное число новых факторов). Количественное влияние этих факторов на изменение производительности весьма различно: от 30% до 10 раз. Все эти факторы количественно взаимовлияют друг на друга и на производительность шлифования оказывают влияние через три обобщенных расчетных технологических фактора (табл. I). Именно это обстоятельство было учтено полученной в исследовании функциональной зависимостью. Количественные значения влияния различных технологических факторов на производительность для их использования в нормативах были получены разными путями. Сопротивление сталей шлифованию, из-за неясности его природы, потребовало изложенного выше аналитического и экспериментального исследования и последующего расчета. Влияние

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ РЯДА НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ
ШЛИФОВАНИЯ (ПОДАЧУ) СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ В ОБЪЕМАХ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ НОРМАТИВОВ

Таблица I

| п.п. | Поправочные коэффициенты на подачу в зависимости от: | ! Степень влияния на производительность | ! Принадлежность к основным расчетным факторам | ! Метод получения величин поправочных коэффициентов |
|------|--|---|--|---|
| 1. | Марок (химсостава) шлифуемой стали | до 10 раз | ! Сопротивление сталей шлифованию | ! Расчет и экспериментальный эксперимент |
| 2. | ! Характеристики кругов, геометрии зерен и их затупления за 15 мин. ! Стойкость кругов | 25% | ! Геометрия зерна и его затупление | ! Эксперимент и использование данных в расчете |
| 3. | Конструктивной жесткости и точности станков разных моделей и сроков их эксплуатации | 30% | | |
| 4. | ! Требуемого класса точности обработки (уточненные данные) | до 2-х раз | | |
| 5. | ! Исходной точности заготовок (для бесцентрового шлифования на проход) | до 2-х раз | | |
| 6. | ! Метода подачи: а) ручная, б) автоматическая | 20% | | |
| 7. | ! Метода контроля размера в процессе обработки: а) прибором активного контроля; б) до упора; в) индикаторной скобой; г) жесткой скобой | 45% | | |
| | ! по "пробным проходам" | | | ! Статистические данные |

Допустимые системы СПИ
 сила резания, $P_{\text{доп}}^{\text{доп}}$
 до 2 кг на 1 см ширины
 круга для чистового шли-
 фования: 1-4 кг. точность
 1-5 кг. чистота

Статистические данные
 прономера и прове-
 рочные расчеты по $P_{\text{с}}$

этого фактора оказалось наиболее существенным на изменение производительности шлифования (до 10 раз). Однако в разных условиях силового нагружения инструмента и разной степени затупления зерен влияние марки стали на производительность шлифования различно. Это потребовало наложения определенных ограничений на изменения других обобщенных расчетных факторов применительно к определенным условиям обработки. В нормативах для шлифования деталей I-4 классов точности и 7-5 классов чистоты поверхности были использованы величины обобщенных факторов (для расчета производительности), установленные либо экспериментально (например, затупление зерен), либо по статистическим данным производства (радиальная сила для условий чистового шлифования). Влияние же отдельных технологических параметров процесса (пункты 3-7 таблицы) на изменение величины допустимой радиальной силы и, следовательно, производительности обработки устанавливалось по приближенным статистическим данным заводов.

Таким образом, анализ сложного взаимовлияния многих технологических факторов позволил путем расчета, эксперимента и использования статистических данных производства получить приближенные значения количественного влияния этих факторов на производительность шлифования деталей I-4 классов точности и 7-5 классов чистоты, изготовленных из разных марок сталей.

Сборники нормативов прошли производственную апробацию на 48 заводах страны, были одобрены заводскими и экспертно-методическим Советом Центрального бюро промышленных нормативов по труду (Госкомитета по труду и зарплате Совмина СССР), изданы и в настоящее время используются в промышленности.

Некоторые теоретические обобщения новых принципов
методики расчета производительности процессов
обработки

Оценка эффективности процесса обработки по производительности является одним из главных показателей в механической обработке. Себестоимость операции механической обработки в большинстве случаев на 80-90% прямо зависит от величины

основного технологического времени и именно с позиций изменения расчетной производительности и стоимости обработки следует оценивать результаты тех или иных вводимых в практику изменений технологических условий обработки.

В настоящем исследовании было проанализировано влияние технологических факторов на производительность шлифования стальных деталей при определенных величинах предельно допустимых системой СПИД радиальных сил, ограничивающих в большинстве случаев точность и качество обработки. Однако разработанная методика расчета производительности имеет определенное значение для количественной оценки производительности различных процессов обработки.

В зависимости от характера выполняемой операции факторы, ограничивающие производительность обработки, могут быть самыми разнообразными и соответственно силы, вызывающие эти ограничения, могут быть разных направлений и величин, не совпадающих с P_y . Тогда, естественно, возникает задача учета этих сил (по интересующим направлениям) до величин, близких к предельно допустимым значениям, вызывающим ограничение производительности. Например, это может быть ограничение по мощности станка для обдирочных работ и неточных деталей, и тогда расчет производительности выполняется по тангенциальной силе. Или, например, сверление глубоких отверстий с регулированием подачи по предельно допустимому прочностью сверла крутящему моменту, т.е. по P_2 , с учетом постепенного износа инструмента, что также отражено в предложенных зависимостях.

В таком аспекте предложенная методика расчета производительности по предельно допустимой системой СПИД силе резания того или иного направления позволяет определить степень количественного влияния того или иного технологического фактора на изменение производительности и рассчитать программу управления процессом по лимитирующему параметру, от которого зависит производительность. Так, например, рассчитанная по допустимому прогибу нежесткой детали радиальная сила может быть использована для расчета максимальной подачи. Кроме этого, при проектировании специальных станков с системами адаптивного управ-

ления могут быть рассчитаны диапазоны изменения сил для выбора датчиков и точности отслеживания или изменения диапазона подач по мере износа инструмента, а также получены другие расчетные параметры управления различными видами обработки.

Многие из ограничивающих производительность факторов входят в общую зависимость в неявном, скрытом виде и потребуют для расчета по ним производительности установления дополнительных связей с входящими в формулу обобщенными факторами. Некоторые из этих связей практически реализованы в шлифовальных нормативах в виде таблиц поправочных коэффициентов. Однако эти коэффициенты отличаются от традиционно применяемых в нормативах, поскольку они отражают физические закономерности в определенном интервале условий. Результаты дополнительных исследований, выходящих за рамки поставленной задачи, могли бы оснастить полученную расчетную зависимость дополнительными математическими связями с многими "внешними" технологическими факторами, изменяющими производительность обработки через расчетные показатели. Дальнейшая математизация для целей проектирования и управления технологическими процессами обработки с помощью ЭВМ делает перспективными такие разработки.

В настоящем исследовании использованы элементы ряда теорий: механики резания и пластического деформирования металлов, адаптивного регулирования режимов обработки, теплофизики, износа и стойкости инструментов и др. В то же время практически любое изменение технологических условий обработки (через изменение критериев перечисленных теоретических направлений) находит свое отражение в изменении (через дополнительные связи) основных факторов, входящих в расчетную формулу.

В работе не всегда удавалось достичь достаточной точности в определении численных значений критериев расчетной зависимости из-за недостаточности прикладного материала и трудностей практического расчета *. Однако понимание природы физических

* Например, при расчете напряжений, характеризующих сопротивление сталей шлифованию, был сделан ряд допущений. Однако уже имеются справочные данные по влиянию скорости деформации и температуры на изменение напряжений в I20 марках сталей (Л.Д.Соколов. Сопротивление деформации сталей. Москва, ЦНИИМ, 1963).

явлений, определяющих производительность обработки, делает перспективным отход от эмпиризма и стремление к определению более точных значений физических характеристик процесса, а также дальнейшее углубление теории.

ВЫВОДЫ

1. Впервые вскрыта физическая сущность причин различной производительности шлифования сталей разного химического состава, позволяющая установить, что производительность шлифования разных сталей зависит от механических свойств тонких поверхностных слоев сталей, нагретых до высоких температур в зоне контакта круга с деталью действием ранее работавших зерен и не зависит от механических свойств "холодной" стали.

2. Решена проблема аналитической оценки производительности процесса шлифования, устанавливающая функциональную связь производительности шлифования с основными технологическими факторами: сопротивлением сталей скоростной деформации, характерной для температур шлифования, величиной внешней радиальной силы и степенью затупления зерен круга.

3. Впервые расчетом определена относительная обрабатываемость 16-ти марок сталей разного химического состава (представителей разных структурных классов). Расчету предшествовало аналитически-экспериментальное определение интенсивности напряжений и температурных полей в зоне шлифования. Разница в расчетной обрабатываемости сталей достигает до 10 раз. Эксперименты показали удовлетворительное совпадение с расчетными данными ($\pm 10\%$).

4. Основные теоретические положения исследования и вытекающие из них расчетные данные легли в основу разработки общемашиностроительных нормативов режимов резания и норм основного времени на шлифовальные работы, в которых впервые учтена разная обрабатываемость сталей шлифованием и ряд других технологических факторов. Разработанные нормативы позволили повысить уровень режимов резания и производительность труда для большинства

широко применяемых сталей в среднем на 40%. По данным ЦСУ и ЦБНИИ народное хозяйство страны за счет внедрения новых нормативов получило экономический эффект в размере 7 млн. рублей.

Полученная зависимость обобщает многие варианты технологических условий, влияющих на производительность процесса. Экспериментальная оценка производительности процессов обработки практически не может охватить всего многообразия существующих и вновь создаваемых сплавов, обрабатываемых в самых различных технологических условиях. Поэтому разработка аналитического метода определения производительности процессов обработки, теоретические основы которого реализованы в настоящем исследовании для шлифования, решает проблему расчетного определения производительности и путей ее повышения, а также способствует составлению наиболее рациональных программ управления металлорежущими станками.

Основные публикации по теме диссертации:

1. Скоростное шлифование. Челябинское книжное издательство, 1958.

2. Внедрение скоростного шлифования на ЧТЗ. "Станки и инструмент", 1959, № 1.

3. Оценка производительности шлифования при работе с постоянным радиальным усилием. "Вестник машиностроения", 1959, № 4.

4. Исследование эффективности скоростного шлифования. "Вестник машиностроения", 1960, № 9.

5. Выбор характеристики кругов при скоростном и обычном шлифовании на основании комплексной оценки шлифования. Сб. "Тезисы докладов и сообщений на 3-м семинаре по основным вопросам высокопроизводительного шлифования". Изд-во АН СССР, 1960.

6. Применение радиоактивных изотопов для выбора смазывающе-охлаждающей жидкости при шлифовании. "Станки и инструмент", 1960, № 10.

7. Повышение производительности шлифования. Челябинское книжное изд-во, 1961.
8. Применение радиоактивных изотопов для выбора смазочно-охлаждающей жидкости при шлифовании. М., Машгиз, 1961.
9. Выбор характеристики шлифовальных кругов. Сб. "Высокопроизводительное шлифование", доклады конференции Имам. АН СССР, 1962.
10. Обрабатываемость сталей при шлифовании кругами различной характеристики. "Вестник машиностроения", 1962, №2.
11. Выбор характеристики шлифовальных кругов при обработке сталей различных марок. ЦИТЭИМ тема В16, 1962.
12. Влияние химического состава стали на производительность шлифования. ГОСИИТИ №6-63-688/143, 1963.
13. Автоматизация универсальных круглошлифовальных станков в действующем производстве. ЦБТИ ЮУ СХК, 1963.
14. Заточка и доводка твердосплавного инструмента алмазными кругами. Там же.
15. Автоматизация универсальных круглошлифовальных станков в действующем производстве. М., НИИТракторосельхозмаш, 1964.
16. Автоматизация цикла работы круглошлифовальных станков. "Механизация и автоматизация производства", 1965, №12.
17. Алмазная обработка как резерв экономии твердых сплавов и инструментальных сталей. В сб. докладов областной научно-технической конференции НТО Машпрома, Челябинск, 1966.
18. Состояние и перспективы применения алмазной обработки в машиностроении. В сб. докладов конф. научных работников, посвященной 50-летию Советской власти. Челябинск, 1967.
19. Общемашиностроительные нормативы режимов резания для технического нормирования работ на шлифовальных и доводочных станках. М., ЦБНПТ, 1967.
20. Прогрессивная технология и автоматизация круглого шлифования. Изд-во "Машиностроение", 1968.
21. Общемашиностроительные нормативы времени для технического нормирования работ на шлифовальных и доводочных станках (укрупненные). (Серийное, мелкосерийное и единичное производство). М., ЦБНПТ, 1968.

22. Обрабатываемость сталей шлифованием. "Вестник машиностроения", 1968, №11.

23. К математической оценке обрабатываемости разных сталей шлифованием. Материалы XXIII научно-технической конф. Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола, 1970.

24. Влияние обрабатываемости сталей разного химсостава на производительность шлифования. Сб. научных трудов №79 Пермского политехнического института, 1970.

25. Механизм взаимодействия шлифовального круга с деталью. Сб. "Прогрессивная технология чистовой обработки деталей машин" №79: ЧПИ, 1970.

26. Нормирование шлифовальных работ с учетом различной обрабатываемости сталей шлифованием. Там же. (Совместно с Г.И.Буторинным).

27. Взаимосвязь обрабатываемости разных сталей шлифованием с точностью обработки и износом кругов. Сб. "Технология машиностроения", ч.Ш, изд-во Томского университета и Томского политехнического института им.С.М.Кирова, 1970.

28. О функциональной связи производительности процесса резания с технологическими условиями обработки. Сб. "Тезисы докладов научно-технической конф. "Прогрессивные методы и инструменты для обработки резанием и пластическим деформированием". Челябинск, НТО, 1971.

29. Масштабное моделирование механизма взаимодействия совокупности зерен шлифовального круга с деталью. Там же.

30. Расчет нестационарного температурного поля поверхностных слоев детали в зоне шлифования. Сб. "Тезисы докладов научно-технической конф. "Прогрессивные методы и инструменты для обработки резанием и пластическим деформированием". Челябинск, НТО, 1971 (совместно с А.А.Кошинным).

31. О сущности и математической оценке обрабатываемости сталей шлифованием. Сб. "У-я Всесоюзная научно-техническая конф. по прогрессивным методам абразивной и алмазной обработки материалов". М., 1971.

32. К анализу взаимосвязи обрабатываемости сталей, стойкости кругов и точности обработки при шлифовании. Сб. "Повышение производительности, экономичности и качества обработки деталей на металлорежущих станках". Изд-во Ижевского механического института, 1971.

33. Расчет температурного поля зоны шлифования. Там же. (Совместно с А.В.Геренштейном и А.А.Кошиным).

34. Расчет относительной производительности шлифования сталей разных марок. "Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки". Сб. научных трудов ИИЧ. Изд-во ЧПИ, 1972.

35. Расчет температурных полей поверхности детали в зоне шлифования. Там же.

36. К математической оценке производительности процессов механической обработки. Там же.

37. Аналитическое определение режимов резания по критерию теплостойкости алмазного инструмента. В сб. тезисов докладов конф. "Теплофизика технологических процессов". Тольятти, 1972 (совместно с А.А.Кошиным).

38. Некоторые особенности влияния СОЖ на производительность шлифования. В сб. "Методы испытаний свойств СОЖ и способы их применения на металлорежущем оборудовании". Ульяновск, 1972.

39. Основы расчета управления процессом шлифования. Краткие тезисы докладов к научно-техническому совещанию "Повышение производительности металлорежущих станков и точности обработки путем применения адаптивных систем". Л., 1973.

40. Аналитические основы ограничений режимов алмазно-абразивной обработки по тепловым критериям. В сб. тезисов докладов Всесоюзной конференции "Теория и практика алмазной и абразивной обработки деталей приборов и машин". М., МВТУ им. Гаумана, 1973 (совместно с А.А.Кошиным).

41. Производительность процесса шлифования стальных деталей. М., изд-во "Машиностроение" (монография 15 а.л., выход по плану изд-ва II квартал 1974г.).

Результаты исследований были доложены на научно-технических конференциях и семинарах по вопросам технологии машиностроения и резания металлов, проходивших в 1963-73 гг. в городах: Москве, Ленинграде, Пскове, Томске, Туле, Перми, Ижевске, Тольятти, Ульяновске, Челябинске, Свердловске и др. В том числе:

1. Межвузовская научно-техническая конференция в Томском политехническом институте им.С.М.Кирова, Томск, 1970.

2. "У Всесоюзная научно-техническая конференция по прогрессивным методам абразивной и алмазной обработки материалов", Москва, 1971.

3. Межвузовская конференция "Теплофизика технологических процессов", Тольятти, 1972.

4. Межвузовская конференция "Методы испытания свойств СОЖ и способы их применения на металлорежущем оборудовании", Ульяновск, 1972.

5. Научно-техническое совещание "Повышение производительности металлорежущих станков и точности обработки путем применения адаптивных систем", Ленинград, 1973.

6. Всесоюзная конференция "Теория и практика алмазной и абразивной обработки деталей приборов и машин", Москва, 1973.