

На правах рукописи

ЛЕОНОВ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
КРУГЛОГО НАРУЖНОГО ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ  
ПУТЕМ ПОЭТАПНОЙ ПОДАЧИ  
СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Специальность 05.03.01 – Технологии и оборудование механической  
и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Ульяновск, 2001

Работа выполнена на кафедре "Технология машиностроения"  
Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ)

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки и техники РФ,  
доктор технических наук, профессор  
**Л.В. ХУДОБИН**

Официальные оппоненты:

Заслуженный деятель науки и техники РФ,  
доктор технических наук, профессор  
**С.Н. КОРЧАК**

кандидат технических наук, доцент  
**А.Н. ЕВСЕЕВ**

Ведущее предприятие – Открытое акционерное общество  
"Утес" (г. Ульяновск)

Защита диссертации состоится 4 октября 2001 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета К 212.277.01 в первом корпусе Ульяновского государственного технического университета по адресу: г. Ульяновск, ул. Энгельса, 3 (почтовый адрес: 432700, ГСП, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке УлГТУ.

Автореферат разослан 22 августа 2001 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат технических наук, профессор



В.Ф. Гурьянихин

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Совершенствование составов и способов подачи смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) является действенным средством повышения эффективности операций шлифования.

Одним из наиболее эффективных является способ последовательного применения по этапам цикла шлифования водной и масляной смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ). В настоящей диссертации этот способ получил дальнейшее развитие путем замены масляной СОЖ твердым смазочным материалом (ТСМ) и совершенствования цикла шлифования. Обладая высокой технологической эффективностью, новые способы поэтапной подачи СОЖ и ТСМ существенно упрощают технику применения СОТС и обеспечивают экологическую безопасность операций шлифования.

Тема работы А.В. Леонова, направленной на повышение эффективности и экологической безопасности круглого наружного врезного шлифования путем разработки новых комбинированных способов подачи СОТС, отвечает запросам производства, что обуславливает ее актуальность.

**Автор защищает:** 1. Результаты теоретико-экспериментальных исследований нового способа поэтапной подачи СОТС при круглом наружном врезном шлифовании и, в частности, теплофизическую модель процесса круглого наружного врезного шлифования с поэтапной подачей СОТС.

2. Результаты экспериментальных исследований технологической эффективности круглого наружного врезного шлифования с поэтапной подачей СОТС и влияния на нее материала обрабатываемой заготовки, режима шлифования и продолжительности этапа шлифования всухую (без подачи СОЖ), предшествующего выхаживанию с подачей ТСМ на заготовку.

3. Методику определения продолжительности этапа шлифования всухую, необходимой для достижения температуры заготовки, требуемой для обеспечения рационального расхода ТСМ при выхаживании.

**Цель работы:** повышение эффективности круглого наружного врезного шлифования на основе разработки новых способов подачи СОТС, повышающих производительность и экологическую безопасность шлифования.

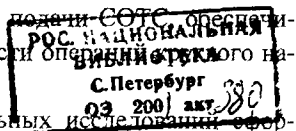
Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать теплофизическую модель круглого наружного врезного шлифования с поэтапной подачей СОТС.

2. Экспериментально проверить гипотезу о зависимости технологической эффективности поэтапной подачи СОТС от температуры обрабатываемой поверхности заготовки.

3. Разработать новые способы и технику поэтапной подачи СОТС, обеспечивающие увеличение технологической эффективности операций круглого наружного врезного шлифования

4. На основе результатов теоретико-экспериментальных исследований разрабо-



мулировать предложения по использованию новой техники подачи СОТС при круглом наружном врезном шлифовании

5. Провести опытно-промышленные испытания новых разработок в условиях действующего промышленного производства.

**Научная новизна:** 1. Разработана теплофизическая модель процесса круглого наружного врезного шлифования с поэтапной подачей СОЖ и ТСМ, учитывающая охлаждение заготовки СОЖ на этапах врезания и съема основной части припуска, отсутствие охлаждения в течение некоторого промежутка времени до начала выхаживания, наличие на поверхности заготовки ТСМ на этапе выхаживания, а также зависимости теплофизических свойств материала обрабатываемой заготовки от температуры.

2. Разработана методика решения предложенной теплофизической модели методом конечных элементов, решение проведено в специализированном программном пакете ANSYS версии 5.5 для различных условий шлифования.
3. Разработана методика определения продолжительности этапа шлифования всухую, при которой поверхность заготовки к началу выхаживания достигнет температуры, обеспечивающей рациональный расход ТСМ.

**Практическая ценность и реализация работы:** 1. Предложены новые способы поэтапной подачи СОЖ и ТСМ, повышающие эффективность шлифования и улучшающие экологическую и санитарно-гигиеническую обстановку в рабочей зоне станка.

2. Экспериментально доказана высокая технологическая эффективность предложенных способов поэтапной подачи СОТС.
3. На основании данных теоретических и экспериментальных исследований разработаны рекомендации по промышленному применению поэтапной подачи СОТС, регламентирующие продолжительность этапа шлифования всухую перед выхаживанием для различных условий обработки.
4. Опытные-промышленные испытания, проведенные на предприятии ОАО "Утес" (г. Ульяновск), подтвердили данные лабораторных исследований.

**Апробация работы.** Основные результаты работы доложены на научно-технических конференциях (НТК) Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ) в 1999, 2000 г.г., НТК "Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы", г. Волжский, 1997, 2000 г.г., на научно-технических семинарах кафедр "Технология машиностроения" и "Металлорежущие станки и инструменты" УлГТУ в 2000, 2001 г.г., на заседании научно-технического совета машиностроительного факультета УлГТУ в 2001 г.

По теме диссертации опубликовано 12 работ, в том числе 6 патентов на изобретения.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (138 наименований) и приложений (59 страниц), включает 161 страницу машинописного текста, 102 рисунка и 31 таблицу.

## 2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*Во введении* обоснована актуальность работы, её практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

*В первой главе*, в результате анализа современного состояния технологий шлифования с применением комбинированных способов подачи СОЖ, выявлено, что известные способы при высокой эффективности, тем не менее, не находят широкого применения в промышленном производстве, поскольку либо ухудшают экологическую и санитарно-гигиеническую обстановку, либо требуют разработки сложных громоздких устройств, многоступенчатой сепарации и обезвреживания отработавших СОЖ.

Перспективным, но недостаточно изученным направлением повышения эффективности шлифования является комбинированное применение водных СОЖ простейшего состава, обладающих хорошими охлаждающими и моющими свойствами, и ТСМ, обладающих высокими смазочными и демпфирующими свойствами, по поэтапной схеме: на этапе врезания и съема основной части припуска в зону контакта круга и заготовки подают поливом водную СОЖ; при выхаживании ее подачу прекращают и к обрабатываемой поверхности заготовки вне зоны ее контакта с кругом прижимают брикет ТСМ. Основная задача при этом – нанесение на шлифуемую поверхность заготовки тонкого и равномерного слоя смазки – решается именно за счет отключения подачи СОЖ, что приводит к нагреву поверхностных слоев материала заготовки до температуры плавления брикета ТСМ.

ТСМ, наносимый на поверхность шлифуемой заготовки, должен удовлетворять следующим условиям: а) однородность; б) высокие антифрикционные свойства; в) температура плавления, соизмеримая с температурой обрабатываемой поверхности заготовки; г) экологическая и санитарно-гигиеническая безвредность компонентов. Добиться выполнения этих условий позволяет приготовление ТСМ, состоящего из антифрикционного наполнителя, например, графита, дисульфида молибдена, нитрида бора, и легкоплавкого связующего, например, стеарина, парафина или технического воска.

Показано, что эффективность поэтапной подачи СОЖ и ТСМ находится в прямой зависимости от тепловых процессов при шлифовании, однако анализ литературных источников не позволил обнаружить теплофизические модели, учитывающие применение при механической обработке СОЖ различного состава, находящихся к тому же в различных агрегатных состояниях. Выдвинута гипотеза о взаимосвязи условий шлифования, температуры поверхности заготовки и эффективности шлифования с поэтапной подачей СОЖ и ТСМ: чем хуже обрабатываемость материала заготовки (при постоянной врезной подаче, окружной скорости заготовки и всех прочих постоянных условиях), тем выше теплосиловая напряженность процесса шлифования; чем больше диаметр заготовки, тем больше интервал времени между моментами прохождения участком

заготовки зоны контакта (т.е. продолжительность этапа остывания заготовки вследствие теплоотвода от ее поверхности вглубь материала и охлаждения окружающей средой); от соотношения уровней влияния этих факторов зависит температура поверхности заготовки, значение которой в решающей степени определяет расход ТСМ на этапе выхаживания и, тем самым, технологическую эффективность шлифования с поэтапной подачей СОТС.

Поэтому возможность применения предлагаемого способа подачи СОТС напрямую связана с разработкой соответствующей теплофизической модели, позволяющей расширить область применения результатов исследования и выйти на разработку соответствующих технологических регламентов.

В заключение сформулированы цель и задачи работы, приведенные выше.

**Во второй главе** представлена теплофизическая модель процесса круглого наружного шлифования с поэтапной подачей СОЖ и ТСМ.

На современном уровне решения тепловых задач нельзя не учитывать зависимости теплофизических свойств материалов заготовок от температуры, поскольку в диапазоне температур, свойственных процессам шлифования, эти свойства изменяются в 1,5 – 2 раза, причем направления изменения, например, теплопроводности  $\lambda$ , для различных обрабатываемых материалов различны.

С учетом этого, аналитическое решение полученной системы нелинейных дифференциальных уравнений не представляется возможным, и для него необходимо применить численные методы, обладающие широкими возможностями.

Основное уравнение теплопроводности для рассматриваемой системы применительно к нестационарному двумерному температурному полю в обрабатываемой заготовке в неподвижной относительно заготовки системе координат имеет известный вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_T(T) \cdot \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \right], \quad (1)$$

где  $T$  – текущее значение температуры в заготовке, К;  $a_T$  – коэффициент температуропроводности материала заготовки, м<sup>2</sup>/с;  $r$  – текущий радиус заготовки, м;  $\varphi$  – угловая координата заготовки, рад.

Дифференциальное уравнение теплопроводности (17) описывает изменение температуры в любой точке заготовки, не находящейся на ее поверхности, т.е. при выполнении условий

$$0 \leq \varphi < 2\pi; \quad 0 \leq r < R, \quad (2)$$

где  $R$  – радиус наружной поверхности заготовки, м.

Уравнение (1) имеет единственное решение, если оговорить соответствующие начальные и граничные условия.

Начальное условие в нашем случае описывается выражением:

$$\tau = 0; T(r, \varphi, \tau) = T_0, \quad (3)$$

где  $\tau$  - время, с;  $T_0$  - температура окружающей среды, К.

Граничные условия представим в следующем виде:

1) Этап врезания с подачей СОЖ поливом (рис. 1; 2. а):

$$0 < \tau \leq \tau_1, \quad (4)$$

где  $\tau_1$  - длительность этапа врезания с подачей СОЖ поливом, с.

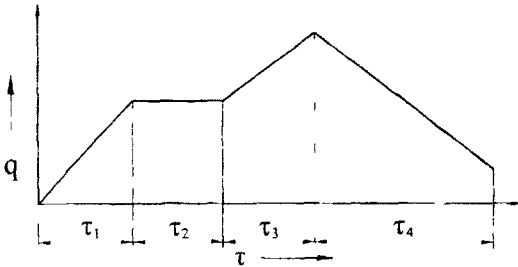


Рис. 1. Изменение плотности теплового потока  $q$ , поступающего в заготовку в течение цикла шлифования:  $\tau_2$  - продолжительность этапа съема основной части припуска с подачей СОЖ;  $\tau_3$  - продолжительность этапа съема основной части припуска всухую;  $\tau_4$  - длительность выхаживания с ТСМ

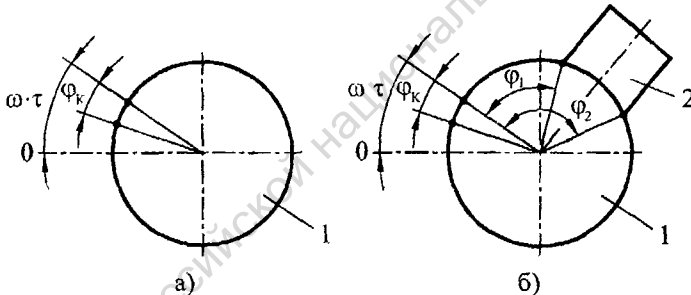


Рис. 2 Граничные условия при шлифовании с поэтапной подачей СОЖ на этапах врезания и съема основной части припуска с подачей СОЖ и съема части припуска без подачи СОЖ (а) и на этапе выхаживания с подачей ТСМ без подачи СОЖ (б): 1 - заготовка; 2 - брикет ТСМ;  $\varphi_k$  - угол, ограничивающий контактную зону, рад;  $\varphi_1$  - угол, определяющий начало контакта заготовки с брикетом ТСМ;  $\varphi_2$  - угол, определяющий окончание контакта заготовки с ТСМ,  $\omega$  - угловая скорость заготовки, рад/с

По наружной поверхности заготовки, омываемой СОЖ:

$$\omega\tau \leq \varphi < [\omega\tau - \varphi_k(\tau)]; \quad r = R; \quad -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha_1(T) \cdot (1 - T_0). \quad (5)$$

В пределах зоны контакта круга и заготовки:

$$[\omega\tau - \varphi_k(\tau)] \leq \varphi < \omega\tau, \quad r = R; \quad -q_1(\tau) = \lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (6)$$

где  $\alpha_1$  - коэффициент теплопередачи от заготовки к СОЖ, Вт/(м<sup>2</sup> · К);  $q_1(\tau)$  - плотность теплового потока, поступающего в заготовку на этапе врезания с подачей СОЖ, Вт/м<sup>2</sup>.

2) Этап съема основной части припуска с подачей СОЖ (см. рис. 1; 2, а):

$$\tau_1 < \tau \leq (\tau_1 + \tau_2). \quad (7)$$

По наружной поверхности заготовки, омываемой СОЖ:

$$\omega \cdot \tau \leq \varphi < (\omega \cdot \tau - \varphi_k); \quad r = R; \quad -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha_1(T) \cdot (T - T_0). \quad (8)$$

В пределах зоны контакта круга и заготовки:

$$(\omega \cdot \tau - \varphi_k) \leq \varphi < \omega \cdot \tau; \quad r = R; \quad -q_2 = \lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (9)$$

где  $q_2 = \text{const}$  – плотность теплового потока, поступающего в заготовку на этапе съема основной части припуска с подачей СОЖ, Вт/м<sup>2</sup>.

3) Этап съема припуска без подачи СОЖ (см. рис. 1; 2, а):

$$(\tau_1 + \tau_2) < \tau \leq (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3). \quad (10)$$

По наружной поверхности заготовки, контактирующей с воздухом:

$$\omega \cdot \tau \leq \varphi < (\omega \cdot \tau - \varphi_k); \quad r = R; \quad -\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha_2(T) \cdot (T - T_0), \quad (11)$$

где  $\alpha_2$  – коэффициент теплопередачи от заготовки в воздух, Вт/(м<sup>2</sup> · К).

В пределах зоны контакта круга и заготовки:

$$(\omega \cdot \tau - \varphi_k) \leq \varphi < \omega \cdot \tau; \quad r = R; \quad -q_3(\tau) = \lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (12)$$

где  $q_3(\tau)$  – плотность теплового потока, поступающего в заготовку на этапе шлифования без подачи СОЖ (всухую), Вт/м<sup>2</sup>.

4) Этап выхаживания с подачей ТСМ на заготовку (см. рис. 1; 2, б):

$$(\tau_1 + \tau_2 + \tau_3) < \tau \leq (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4). \quad (13)$$

По наружной поверхности заготовки, контактирующей с окружающим воздухом:

$$\omega \cdot \tau \leq \varphi < (\omega \cdot \tau + \varphi_1); \quad r = R; \quad -\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha_2(T) \cdot (T - T_0). \quad (14)$$

По наружной поверхности заготовки, контактирующей с ТСМ:

$$(\omega \cdot \tau + \varphi_1) \leq \varphi < (\omega \cdot \tau + \varphi_2); \quad r = R; \quad T_1(R, \varphi, \tau) = T_2(R, \varphi, \tau); \\ -\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} = \lambda_1(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (15)$$

где  $\lambda_1$  – теплопроводность ТСМ, Вт/(м<sup>2</sup> · К).

По наружной поверхности заготовки, контактирующей с нанесенным на нее слоем ТСМ:

$$(\omega \cdot \tau + \varphi_2) \leq \varphi < (\omega \cdot \tau - \varphi_k); \quad r = R; \quad -\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha_3(T) \cdot (T - T_0), \quad (16)$$

где  $\alpha_3$  – коэффициент теплопередачи от заготовки в слой ТСМ, Вт/(м<sup>2</sup> · К).



В пределах зоны контакта круга и заготовки:

$$(\omega \cdot \tau - \varphi_k) \leq \varphi < \omega \cdot \tau; \quad r = R; \quad -q_4(\tau) = \lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (17)$$

где  $q_4$  – плотность теплового потока, поступающего в заготовку на этапе выхаживания с нанесением на ее поверхность ТСМ, Вт/м<sup>2</sup>.

Анализ результатов расчета в пакете ANSYS теплового состояния заготовки по разработанной теплофизической модели показал, что получение эффекта от комбинированного использования СОЖ и ТСМ возможно только при поэтапной схеме их применения. Объясняется это тем, что при одновременном их применении (см. пример на рис. 3, а) СОЖ, подаваемая поливом на заготовку, охлаждает ее настолько, что при каждом обороте заготовки ее температура к моменту контакта с брикетом ТСМ опускается практически до температуры окружающей среды, что не обеспечивает плавления ТСМ. При отключении подачи СОЖ температура поверхности заготовки после контакта с кругом снижается не так интенсивно, и к моменту контакта с брикетом ТСМ заметно отличается от температуры окружающей среды (рис. 3, б), но все же остается гораздо меньшей температуры плавления связующего ТСМ.

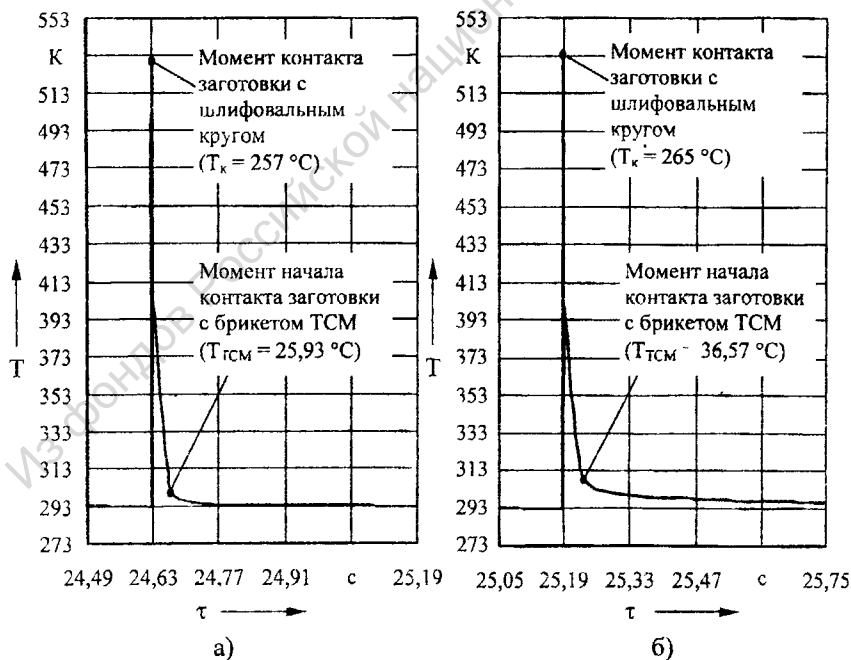


Рис. 3. Изменение температуры элементарного участка поверхности заготовки в пределах одного ее оборота: а – шлифование с подачей СОЖ; б – шлифование всухую. заготовки из стали 30ХГСА.  $D_s = 70$  мм; круг 25A25HСM16K5;  $S_{np} = 0,2$  мм/мин

Очевидно, что для достижения поверхностью заготовки температуры плавления ТСМ нужен большой период времени шлифования всухую (рис. 4), т.е. несколько оборотов заготовки, шлифуемой без подачи СОЖ. С течением времени, от оборота к обороту, температура поверхности заготовки при шлифовании всухую постепенно возрастает (см. рис. 4), что объясняется как ухудшением теплоотвода с ее поверхности, так и увеличением касательной силы шлифования.

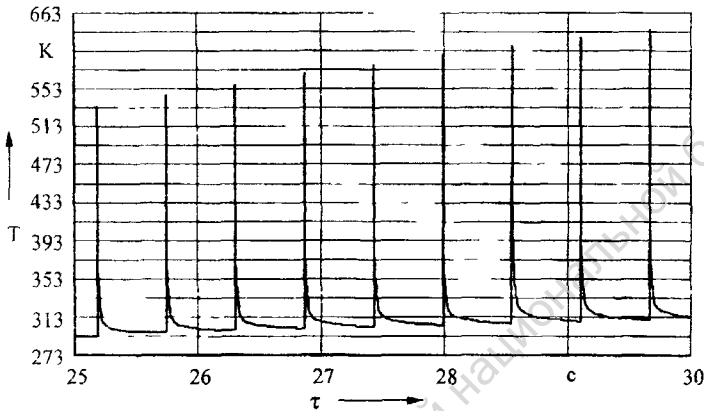


Рис. 4 Изменение температуры элементарного участка поверхности заготовки при шлифовании всухую. материал заготовки — сталь 30ХГСА,  $D_3 = 70$  мм; крут 25A25HMC16K5;  $S_{вр} 0,2$  мм/мин

При выхаживании с нанесением на заготовку ТСМ (без подачи СОЖ поливом), когда  $P$ , относительно быстро снижается, температура  $T_{ТСМ}$  контакта заготовки с ТСМ тем не менее продолжает повышаться за счет пониженного теплоотвода, затем устанавливается на определенном уровне и, наконец, также начинает снижаться (рис. 5).

С точки зрения возможности применения поэтапной подачи СОТС нас прежде всего интересуют значения температуры, которых достигает поверхность заготовки к моменту ее контакта с брикетом ТСМ (см. рис. 1). Влияние на эту температуру (обозначенную нами  $T_{ТСМ}$ ) таких факторов, как врезная подача, материал и диаметр заготовки, проявляется при поэтапной подаче СОТС следующим образом: при отключении подачи водной СОЖ более интенсивный рост  $T_{ТСМ}$  наблюдается при увеличении врезной подачи, номера группы шлифуемого материала и уменьшении диаметра заготовки (рис. 6, 7, 8). В результате сокращается необходимый для обеспечения плавления ТСМ период "сухого" шлифования.

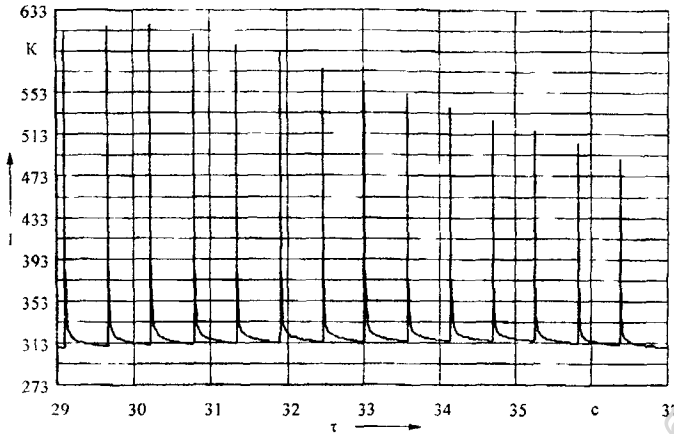


Рис. 5. Изменение температуры элементарного участка поверхности заготовки при выхаживании с подачей ТСМ. материал заготовки – сталь 30ХГСА,  $D_3 = 70$  мм; круг 25А25НСМ16К5;  $S_{\text{вр}} = 0,2$  мм/мин

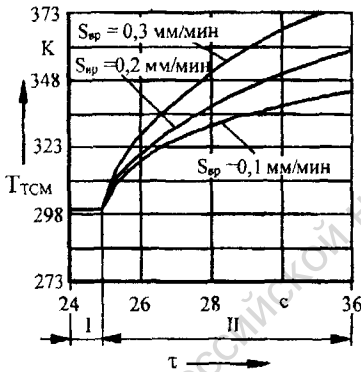


Рис 6 Изменение температуры контакта заготовки с брикетом ТСМ в зависимости от врезной подачи  $S_{\text{вр}}$ : I – шлифование с подачей СОЖ; II – шлифование всухую; заготовка из стали 30ХГСА,  $D_3 = 70$  мм; круг 25А25НСМ16К5

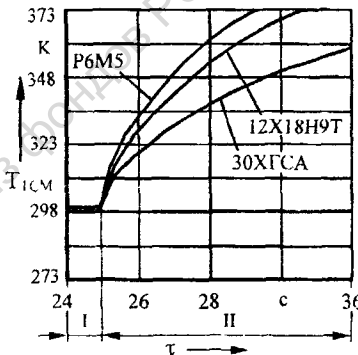


Рис 7 Изменение температуры контакта заготовки с брикетом ТСМ в зависимости от материала заготовки. I – шлифование с подачей СОЖ; II – шлифование всухую;  $D_3 = 70$  мм; круг 25А25НСМ16К5.  $S_{\text{вр}} = 0,2$  мм/мин

Таким образом, во второй главе с помощью пакета ANSYS произведен расчет температур при различных сочетаниях факторов, влияющих на тепловые процессы в зоне шлифования и в обрабатываемой заготовке. Проверка адекватности разработанной модели, проведенная при шлифовании заготовок из стали

30ХГСА с установленными в них полуискусственными термopаpами, показала удовлетворительное совпадение теоретических и экспериментальных данных.

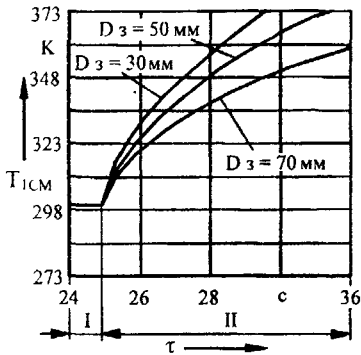


Рис. 8. Изменение температуры контакта заготовки с брикетом ТСМ в зависимости от диаметра заготовки  $D_з$ : I – шлифование с подачей СОЖ; II – шлифование всухую; заготовка из стали 30ХГСА; круг 25А25НСМ16К5;  $S_{вр} = 0,2$  мм/мин

В третьей главе изложена методика экспериментальных исследований технологической эффективности поэтапной подачи СОЖ и ТСМ, включающая состав опытов, статистическую и метрологическую оценку полученных экспериментальных данных. Исследования проводили на экспериментальной установке, смонтированной на базе круглошлифовального станка 3В110. Подачу ТСМ (прижим брикета ТСМ к поверхности заготовки) производили при помощи устройства, показанного на рис. 9.

Устройство работает следующим образом. Перед началом цикла шлифования брикет ТСМ 7 отводят от заготовки в крайнее верхнее положение и фиксируют в этом положении штифтом 15 на штоке 14. Для подачи брикета ТСМ на заготовку освобождают фиксатор (штифт 15) поворотом рукоятки 12 на (90–180)°. Под действием пружины 16 брикет 7 прижимается к поверхности заготовки 2. ТСМ, контактирующий с нагретой поверхностью заготовки, плавится и равномерно тонким слоем наносится на эту поверхность. Ход брикета 7 ограничен стопорной шайбой 11 на штоке 14.

Кругами 1-250x25x76 25А25НСМ16К5 шлифовали заготовки из пяти широко применяемых в промышленности сталей, представляющих три группы обрабатываемости металлов шлифованием, – 30ХГСА, ХВГ, 40ХФА (первая группа шлифуемости), 12Х18Н9Т (третья группа), Р6М5 (пятая группа).

В качестве СОЖ использовали 0,3 % - ный водный раствор кальцинированной соды (для шлифования заготовок из стали 12Х18Н9Т использовали 5 % - ную эмульсию Аквол-6). СОЖ подавали в зону шлифования поливом с расходом 4 дм<sup>3</sup>/мин на каждые 10 мм длины контакта шлифовального круга с заготовкой при давлении жидкости 0,025 МПа.

Сравнивали шесть экспериментальных составов ТСМ, антифрикционными наполнителями в которых являлся графит либо дисульфид молибдена в различных концентрациях, а связующим – технический воск.

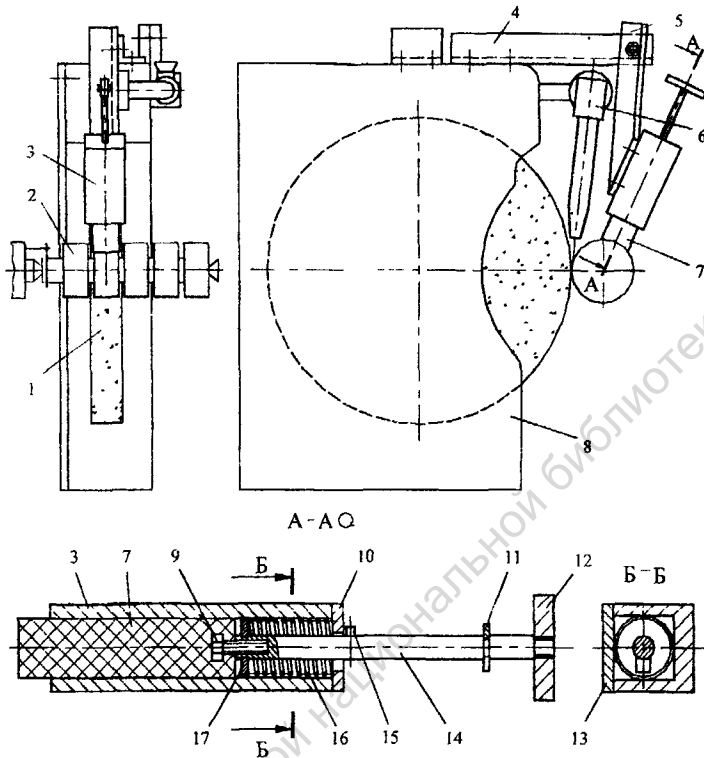


Рис 9 Экспериментальная установка для поэтапной подачи СОТС: 1 – шлифовальный круг; 2 – заготовка; 3 – корпус; 4, 5 – кронштейны; 6 – сопло для подачи водной СОЖ; 7 – брикет ТСМ; 8 – защитный кожух; 9 – болт; 10 – крышка; 11 – шайба; 12 – рукоятка; 13 – крышка; 14 – шток; 15 – штифт; 16 – пружина; 17 – шайба

Режимы круглого наружного шлифования установили по результатам предварительных опытов и в соответствии с имеющимися рекомендациями. Частота вращения шлифовального круга составляла 2675 об/мин, что при наружном диаметре круга 250 мм соответствует окружной скорости 35 м/с. Окружную скорость заготовки поддерживали постоянной – 35 м/мин. Диапазон изменения величины врезной подачи с учетом жесткости испытательного стенда, а также для наглядности полученных результатов – (0,1 – 0,3) мм/мин.

Критериями оценки технологической эффективности шлифования с поэтапной подачей СОТС являлись: среднее арифметическое отклонение профиля шлифованной поверхности  $R_a$ , мкм; высота неровностей профиля по десяти точкам  $R_z$ , мкм; наибольшая высота неровностей профиля  $R_{max}$ , мкм; средний шаг неровностей  $S$ , мм; средний шаг неровностей по вершинам  $S_m$ , мм; относительная опорная длина профиля  $t_r$ , %; коэффициент шлифования  $K_p$ ; эффективная мощность шлифования  $N_{эш}$ , кВт; удельная мощность шлифования  $N_u$ , кВт·мин·мм<sup>-3</sup>; объемная режущая способность круга  $Q_M$ , мм<sup>3</sup>·мин<sup>-1</sup>; линейный

съем металла  $z$ , мм; расход ТСМ  $\Delta G$ , г/мин; составляющие силы шлифования  $P_1, P_2, N$ ; отклонение от круглости  $\Delta C$ , мкм; приведенная режущая способность круга  $k$ ,  $\text{мм}^3 \cdot \text{Н}^{-1} \cdot \text{мин}^{-1}$ .

На этапе предварительных экспериментов варьирование всеми возможными сочетаниями подачи СОЖ поливом и контактного нанесения ТСМ (например, подача СОЖ в течение всего цикла обработки; подача СОЖ и ТСМ в течение всего цикла обработки; подача ТСМ только на этапах врезания и съема основной части припуска, а СОЖ – только при выхаживании, и т.п.) показало, что по технологической эффективности поэтапный способ подачи СОЖ и ТСМ по схеме "СОЖ при врезании и съеме основной части припуска – ТСМ при выхаживании", обозначенный нами СП2, значительно превосходит все остальные исследованные способы. Поэтому дальнейшие эксперименты проводили, сравнивая этот способ (и его разновидности) с традиционно применяемым на предприятиях поливом СОЖ в зону обработки (СП1), принятым нами за базовый.

Различие в тепловом режиме шлифования заготовок из сталей различных групп шлифуемости, например, сталей ХВГ и Р5М5, отмеченное при анализе результатов расчетов по представленной во второй главе теплофизической модели, вызвало необходимость управления расходом ТСМ. Это привело к разработке на базе СП2 новых способов подачи СОТС (табл.), позволяющих управлять температурой, которую приобретает обрабатываемая поверхность заготовки к началу этапа выхаживания, в течение которого применяется ТСМ.

Исследованные способы подачи СОТС

Обозначение способа подачи СОТС	Этапы цикла шлифования		
	Врезание и съем основного припуска		Выхаживание
	Продолжительность шлифования с подачей СОЖ, с	Продолжительность шлифования без подачи СОЖ, с	Продолжительность шлифования с подачей ТСМ, с
СП1	40	–	–
СП2	30	–	10
СП2А	25	5	10
СП2Б	20	10	10
СП2В	15	15	10

На этапе установившегося процесса шлифования, когда происходит съем основной части припуска с подачей СОЖ, за определенное время до начала выхаживания подачу СОЖ прекращают, продолжая шлифование без подачи СОЖ. Интенсивность охлаждения поверхности заготовки вследствие этого резко снижается, что приводит к постепенному повышению температуры ее поверхностных слоев. Таким образом, температура поверхности заготовки к началу выхаживания оказывается выше, чем при шлифовании с поливом СОЖ в зону обработки, причем степень ее повышения находится в прямой зависимости от продолжительности "сухого" шлифования, что было убедительно доказано тео-

ретическими и экспериментальными исследованиями, представленными в главе 2. Рост температуры приводит к увеличению расхода ТСМ, что сказывается на изменении технологической эффективности шлифования. На этой основе предложены новые способы поэтапной подачи СОТС – СП2А, СП2Б и СП2В (см табл.), различие между которыми заключается лишь в продолжительности шлифования всухую, составляющей в нашем случае соответственно 5, 10 и 15 с. Такие значения интервалов времени были выбраны по результатам предварительных экспериментов с целью сравнения разработанных способов в достаточно широком интервале значений врезной подачи и групп шлифуемости металлов (1-я, 3-я и 5-я группы).

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований технологической эффективности круглого наружного шлифования с поэтапной подачей СОТС по методике, изложенной в главе 3.

При обработке заготовок из сталей 30ХГСА и Р6М5 с подачей СОЖ поливом (традиционный СП1) и с подачей СОЖ и ТСМ наиболее эффективным по данным экспериментов первого этапа поэтапным способом СП2 (см. табл.) выявили стабильный положительный эффект от применения СП2: параметр шероховатости  $R_a$  поверхностей, шлифованных с подачей СОТС способом СП2, был меньше, чем при обработке с подачей СОЖ поливом (СП1), на (24 – 50) % (рис. 10). Представленные на рис. 10 результаты свидетельствуют о возможности вести обработку с применением поэтапной подачи СОЖ и ТСМ с трехкратным увеличением поперечной подачи при обеспечении шероховатости  $R_a$  на уровне шлифования с традиционной подачей СОЖ поливом.

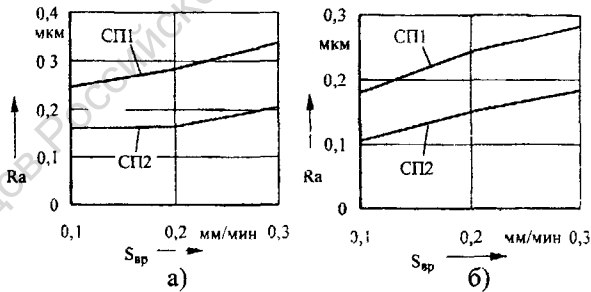


Рис. 10. Среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$  шлифованной поверхности заготовки в зависимости от врезной подачи  $S_{вп}$ : а – заготовки соответственно из стали 30ХГСА и Р6М5

Наиболее эффективным в условиях исследований оказался состав ТСМ 60 % технического воска – 40 % серебристого графита. Этот состав использовали в дальнейших экспериментах.

В начале экспериментальных исследований технологической эффективности шлифования с поэтапной подачей СОТС зафиксировано значительное (до 50 %) снижение высотных параметров шероховатости шлифованных поверхно-

стей заготовок их сталей 30ХГСА и Р6М5 благодаря поэтапной подаче СОЖ и ТСМ по способу СП2 (см. табл.). При шлифовании заготовок из стали ХВГ относительная эффективность поэтапного способа СП2 уменьшилась. Ra и другие высотные параметры шероховатости уменьшились в среднем на 23 %. Поскольку исследованные заготовки различались уровнем шлифуемости (1-я группа для 30ХГСА и ХВГ и 5-я группа для Р6М5), а также наружным диаметром (диаметр заготовок из стали 30ХГСА составлял 25 мм, заготовок из стали Р6М5 – 40 мм, а заготовок из стали ХВГ – 45 мм), этот факт выступил еще одним подтверждением выдвинутой в первой главе гипотезы о зависимости эффективности поэтапной подачи СОТС от материала, размеров и, соответственно, температуры поверхности заготовки и привел к разработке на базе СП2 новых способов поэтапной подачи СОТС (см. табл.), значительно повысивших эффективность обработки заготовок из этих сталей. Иллюстрацией этому служат данные, приведенные на рис. 11: увеличение расхода ТСМ (рис. 11, б) сопровождается снижением шероховатости (Ra) шлифованной поверхности (рис. 11, а).

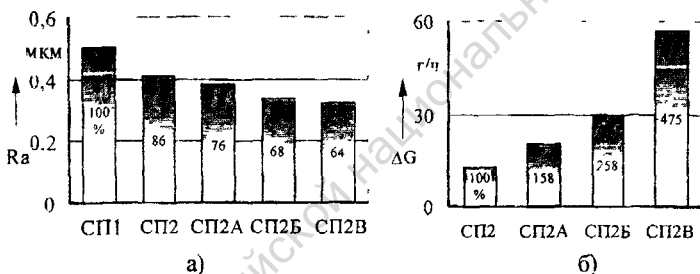


Рис 11 Зависимость шероховатости (Ra) поверхности заготовки из стали ХВГ (а) и расхода ТСМ ΔG (б) от способа подачи СОТС; круг 25А25НСМ16К5;  $S_{вр} = 0,2$  мм/мин

Выявлено, что наряду со снижением высотных параметров шероховатости шлифованных поверхностей наработка шлифовального круга при поэтапной подаче СОТС возрастает в 1,5 – 2,5 раза (рис. 12).

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования показали, что предложенные способы поэтапной подачи СОТС обеспечивают возможность повышения эффективности шлифования заготовок из сталей, резко различающихся по уровню шлифуемости. Адаптация предложенной поэтапной схемы применения СОЖ и ТСМ к различным условиям шлифования заключается в варьировании величиной интервала времени шлифования всухую перед переходом на выхаживание, правильный подбор длительности которого определяет эффективность поэтапной подачи СОТС

**В пятой главе** представлены защищенные патентами Российской Федерации новые способы и устройства для поэтапной подачи СОТС и другие разработки, касающиеся технологии и техники применения поэтапной подачи СОТС, и рекомендации по ее промышленному использованию. Приведены также результаты



опытно-промышленных испытаний устройства для поэтапной подачи СОТС в условиях приборостроительного производства ОАО "Утес" (г. Ульяновск), которые подтвердили результаты лабораторных исследований: поэтапное применение СОЖ и ТСМ обеспечило снижение шероховатости ( $R_a$ ) шлифованных поверхностей деталей на 50 % и увеличение периода стойкости круга на 66 %

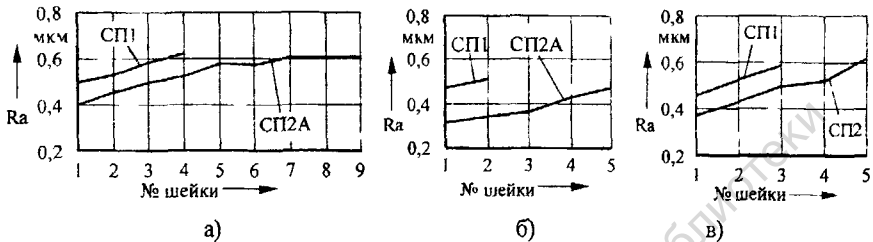


Рис 12. Зависимость шероховатости ( $R_a$ ) шлифованной поверхности и стойкости круга 25A25НСМ16К5 от способа подачи СОТС. а – заготовки из стали ХВГ,  $S_{вр} = 0,2$  мм/мин; б – заготовки из стали 12Х18Н9Т,  $S_{вр} = 0,1$  мм/мин; в – заготовки из стали 40ХФА,  $S_{вр} = 0,3$  мм/мин

### 3. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

В результате выполненных исследований получены следующие научные выводы и практические результаты:

1. Теоретически и экспериментально доказана гипотеза о зависимости технологической эффективности поэтапной подачи СОЖ и ТСМ от теплового режима обработки, выдвинутая в первой главе диссертации.
2. Разработана теплофизическая модель шлифования с поэтапной подачей СОТС, учитывающая охлаждение заготовки СОЖ при врезании и съеме основного припуска, отсутствие охлаждения в течение некоторого времени до начала выхаживания и наличие на поверхности заготовки ТСМ на этапе выхаживания.
3. По разработанной теплофизической модели, с применением оригинальной методики, в специализированном программном пакете ANSYS произведен расчет теплового состояния заготовки при различных условиях обработки.
4. Экспериментально определено влияние расхода ТСМ на технологическую эффективность шлифования с поэтапной подачей СОТС.
5. На основе анализа результатов теоретического и экспериментального исследований разработаны рекомендации по промышленному применению поэтапной подачи СОТС, для реализации которых предложены защищенные патентами Российской Федерации способ и устройство, а также ряд других разработок, позволяющие расширить область применения результатов работы.
6. Проведены опытно-промышленные испытания технологии и техники поэтапной подачи СОТС, обеспечившие снижение шероховатости ( $R_a$ ) шлифованных поверхностей деталей на 50 % и увеличение периода стойкости круга на 66 %.

*По теме диссертации опубликованы следующие работы:*

- 1 Веткасов Н.И., Связова Е.А., Леонов А.В., Курушин Д.А. Прочностные свойства композиционных шлифовальных кругов // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Сборник трудов международной научно-технической конференции "Шлифабразив – 97". Волжский. ВолжскИСИ, 1997. С. 25 – 27.
2. Веткасов Н.И., Леонов А.В. Определение области устойчивой работы КШК на операции шлифования // Тезисы докладов XXXIII научно-технической конференции Ульяновск: УлГТУ, 1999. С. 13 – 14.
- 3 Веткасов Н.И., Леонов А.В. Исследование эффективности комбинированной подачи смазочно-охлаждающих технологических средств на операциях круглого наружного шлифования // Тезисы докладов XXXIV научно-технической конференции. Ульяновск: УлГТУ, 2000. С. 25 – 26.
- 4 Худобин Л.В., Леонов А.В. Поэтапное применение СОЖ и твердых смазочных материалов при шлифовании // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы Сборник трудов международной научно-технической конференции "Шлифабразив – 2000". Волжский: ВолжскИСИ, 2000. С. 25 – 27.
- 5 Худобин Л В Леонов А В Экспериментальное исследование сил шлифования с поэтапной подачей жидких и твердых СОТС // Вестник УлГТУ. Ульяновск: УлГТУ, 2000. С. 68 – 71.
- 6 Леонов А В Шероховатость поверхностей, шлифованных с поэтапной подачей СОТС // Перспективные методы и средства обеспечения качества летательных аппаратов: сборник научных трудов Ульяновск: УлГТУ, 2000. С. 77 – 81.
- 7 Патент RU 2115536 РФ, МКИ 6 В24 D 5/10, 17/00. Шлифовальный круг / Л.В. Худобин, Н.И. Веткасов, А.В. Леонов. 96103010/02. Заявл. 15.02.96. Оpubл. 20.07.98. Бюл. № 20.
- 8 Патент RU 2152861 РФ, МКИ 7 В24 В 1/00, 55/02. Способ шлифования / Л.В. Худобин, Н.И. Веткасов, Е.А. Связова, А.В. Леонов. 97117377/02. Заявл 21.10.97. Оpubл. 20.07.00. Бюл. № 20.
- 9 Патент RU 2153970 РФ, МКИ 7 В24 D 5/10, В24 В 55/02. Сборный абразивный круг / Л.В. Худобин, Н.И. Веткасов, А.В. Леонов. 96118946/ 02. Заявл. 24.09.96. Оpubл. 10.08.00. Бюл. № 22.
10. Патент RU 2153975 РФ, МКИ 7 В24 D 7/10, В24 В 55/02. Шлифовальный круг / Л.В. Худобин, Н.И. Веткасов, А.В. Леонов. 98116928/02. Заявл 11.09.98. Оpubл. 10.08.00. Бюл. № 22.
11. Патент RU 2162399 РФ, МКИ 7 В24 В 5/04, 55/02. Металлорежущий станок / Л.В. Худобин, Н.И. Веткасов, А.В. Леонов 99123037/02. Заявл. 02.11.99. Оpubл. 27.01.01. Бюл. № 3.
- 12 Патент RU 2162403 РФ, МКИ 7 В24 В 55/02. Способ подачи смазочно-охлаждающего технологического средства / Л.В. Худобин, Н.И. Веткасов, А.В. Леонов. 99112375/02 Заявл. 11.06.99. Оpubл. 27.01.01. Бюл. № 3.

Автореферат

**ЛЕОНОВ А.В.  
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КРУГЛОГО НАРУЖНОГО  
ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ПУТЕМ  
ПОЭТАПНОЙ ПОДАЧИ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ**

Подписано в печать 3 07 01 Формат 60x84/16

Бумага писчая Усл п.л 1,25. Уч -изд л 1,125

Тираж 100 Заказ 1593.

Типография УлГТУ 432027, Ульяновск, ул. Сев. Венец, 32.

2001-A  
9482

- 9482

Из фондов Российской национальной библиотеки