

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ СТАЛИ В УСЛОВИЯХ АБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ

Сафонов Борис Петрович,

Новомосковский институт Российского
химико-технологического университета им. Д.И.Менделеева
05.02.01
boris_safonov@mail.ru

Аннотация. Деформационное поведение сталей при изнашивании характеризуется интенсивностью развития пластической деформации металла и глубиной ее распространения. В статье приведены результаты исследования пластической деформации стальных образцов в условиях трибологического нагружения при микрорезании.

Ключевые слова: абразивное изнашивание, деформационное упрочнение, остаточные напряжения, продукты изнашивания.

INVESTIGATION OF THE DEFORMATION BEHAVIOUR OF STEEL UNDER THE ABRASIVE WEAR

Safonov Boris Petrovitch

Russian D.I. Mendeleev University of Chemistry and Technology,
Novomoskovsk Institute

Abstract. Deformation behavior of steels during wear is characterized by the intensity of development of plastic deformation of the metal and the depth of its distribution. The article includes the results of studies of the plastic deformation of steel samples in the conditions of tribology loading at microcutting.

Keywords: Abrasive wear, deformation hardening, residual stresses, wear products.

Для широкой номенклатуры оборудования характерно изнашивание деталей при скольжении по абразиву, происходящее в условиях микрорезания на контакте. Микрорезание имеет место при взаимодействии с перерабатываемыми абразивными массами рабочих органов транспортирующих и дробящих агрегатов в химической отрасли, деталей строительных машин и породоразрушающего инструмента. В условиях микрорезания контактное разрушение происходит при однократном или многократном взаимодействии металла с абразивом [1].

Для исследования деформационного поведения сталей при изнашивании в материале образца необходимо создать трибологическое нагружение, соответствующее данному виду контактного взаимодействия. Для изнашивания абразивом основным идентифицирующим признаком вида изнашивания является наличие трибологического взаимодействия

исследуемого образца с абразивом разной степени закреплённости [1, 2].

Экспериментальные исследования, результаты которых представлены в докладе, проводились в Рейнско-Вестфальской высшей технической школе (г.Ахен) во время научной стажировки автора в ФРГ по международному обмену.

Абразивная поверхность моделировалась шлифовальной бумагой, наклеенной на металлическое контртело для обеспечения необходимой жесткости поверхности контакта. Абразив – электрокорунд зернистостью 50, 80 (основные испытания), 200 мкм. Использование электрокорунда позволило реализовать микрорезание на контакте металл-абразив.

Трибологическое нагружение реализовалось при скольжении торца образца по кольцевой абразивной поверхности трения в стационарных условиях: удельное давление $p = 1$ МПа, скорость скольжения $v = 0,3$ м/с, время испытания $\tau = 2$ мин.

При трибологических испытаниях кратность использования абразивной поверхности составляла $\alpha = 625$, что является средним значением для аналогичных методик $\alpha = 1-1338$ [3]. В нашем исследовании абразивная поверхность располагалась сверху, что способствовало гравитационному очищению ее от продуктов изнашивания и отколовшихся частиц абразива. Для оценки абразивной способности контртела проводили визуальный контроль шлифовальной бумаги и величины силы трения. Установлено, что абразив на поверхности контртела сохраняется (рис. 1), а сила трения имеет стабильное значение во время цикла испытаний (рис. 2.).

Исследования проводились на термообработанных образцах из сталей 45, 50ХН2МФА-Ш, 40Х13, P18, 12Х18Н10Т и Fe-армко. Термообработка образцов состояла в закалке и отпуске в диапазоне температур 100-600°C (P18 трехкратный отпуск 500-800°C), 12Х18Н10Т – после аустенизации.

Исследования касались трех аспектов механизма контактного разрушения металла абразивом: масштаб силового и термического влияния зоны контакта, деформационное упрочнение поверхностного слоя, исследование отделившихся фрагментов металла (частиц износа).

Линейный масштаб развития деформационных процессов в металле, инициируемых трибологическим нагружением составляет величину $\sim 10-1000$ мкм. Поэтому для исследования поверхности трения стальных образцов были использованы металлографический и рентгенографический методы, позволяющие изучать строение и физико-механические свойства тонких поверхностных слоев металла.

Для металлографических исследований из образцов вырезали металлографические образцы. Плоскость реза была ориентирована таким образом, чтобы вектор скорости скольжения для средней точки поверхности трения совпадал с плоскостью реза. Методика приготовления микрошлифов соответствовала [4]. Для исследования распределения свойств поверхностного слоя металла образца по глубине возникла необходимость послойного съема материала. С этой целью проводилось электролитическое полирование образцов на приборе фирмы «Struers» электролитом А2. Для образцов диаметром 10 мм условия электролитического полирования были следующими: напряжение – 25 В, плотность тока – $3,3 \text{ А}\cdot\text{см}^{-2}$. Толщина снятого при электрополировании слоя контролировалась индикатором часового типа с точностью до 0,001 мм.

Использование растрового электронного микроскопа (РЭМ) позволило исследовать морфологию поверхности трения в первозданном виде. При трибологическом нагружении, реализованном в данном исследовании, поверхность трения образцов в процессе испытания приобретала рельеф, характерный для данного вида изнашивания (рис.3), в виде системы деформационных канавок-следов взаимодействия металла с отдельными абразивными частицами.

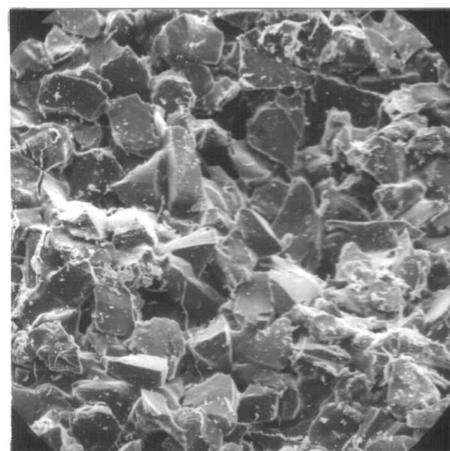


Рис. 1. РЭМ. Микрофотография абразивной поверхности после испытаний ($\times 100$).

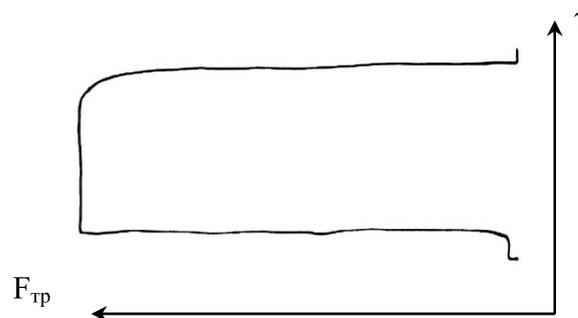


Рис. 2. Диаграмма силы трения за цикл испытания.

Для определения толщины деформированного слоя исследовали на РЭМ микрошлифы изношенных образцов. Структура отожженной стали 45 представляет собой феррито-перлитную смесь. Перлит имеет мелкопластинчатое строение со случайной ориентацией пластин. В слое, прилегающем к поверхности трения, ориентация перлитных зерен приобретает преимущественное направление по сдвигающему усилию (рис.4). Толщина слоя выра-

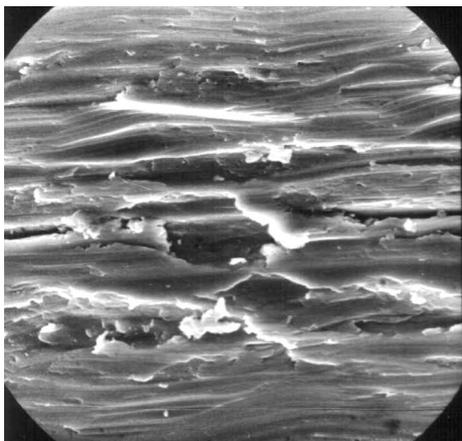


Рис. 3. РЭМ. Микрофотография поверхности трения образца, сталь 12X18H10T, HV150 ($\times 2000$).

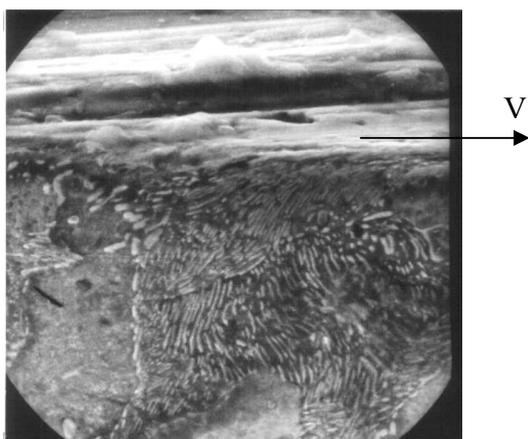


Рис. 4. РЭМ. Микрофотография шифа, сталь 45 HV168 ($\times 3000$). Стрелка на фото указывает направление скорости скольжения.

женной пластической деформации для отожженной стали составляет величину порядка 5-10 мкм. Аналогичные исследования закаленных и отпущенных образцов показали, что для мартенситной и сорбитной структуры визуальная идентификация деформированного слоя изношенных образцов по микрофотографиям шлифов затруднительна.

Дополнительная информация о пластической деформации поверхностного слоя металла при трибологическом нагружении была получена при исследовании остаточных напряжений, формирующихся в материале при изнашивании. Остаточные

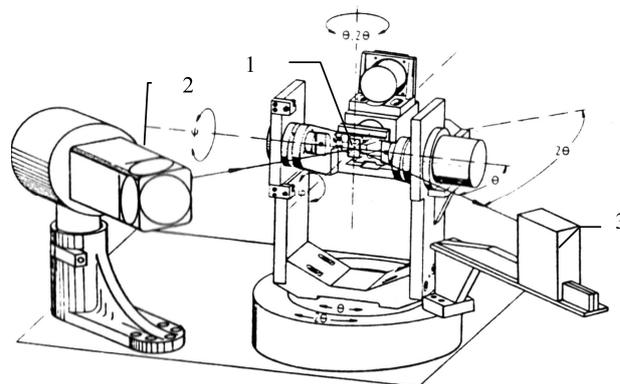


Рис. 5. Схема ψ гониометра для измерения остаточных напряжений: 1 – предметный столик, 2 – рентгеновская трубка, 3 – детектор.

напряжения представляют собой напряжения, формирующиеся в материале и остающиеся в нём после снятия причины их возникновения. Остаточные напряжения являются универсальным средством обнаружения различных эффектов на поверхности образца, обусловленных механическим, термическим воздействием или фазовыми превращениями в материале [5].

Для определения остаточных напряжений использован ψ -гонометр конструкции Г.Краузе с сотрудниками [6]. Образец размещается на предметном столике гониометра (рис.5) таким образом, чтобы луч из рентгеновской трубки 2 попадал в выбранную точку исследуемой поверхности. С помощью шаговых двигателей угла дифракции ($\theta-2\theta$), полярного угла ψ , азимутального угла ϕ образец по заданной программе перемещается в пространстве, при этом детектор 3 регистрирует отраженный от поверхности образца луч. Рентгеновские исследования проводились в кобальтовом излучении анода – CoK α (40кВ, 35мА). Для сталей 45, 40X13, 50XН2МФА-Ш, P18 и Fe-армко использовали линию интерференции Fe α {211}, для стали 12X18H10T – Fe γ {311}.

Для всех исследованных сталей получено, что на поверхности трения образцов формируются остаточные сжимающие напряжения (рис. 6), причем модуль продольного напряжения $|\sigma_x|$ (направлено параллельно скорости скольжения) и модуль поперечного напряжения $|\sigma_y|$ (направлено перпендикулярно скорости скольжения) пропорциональны друг другу (рис. 7).

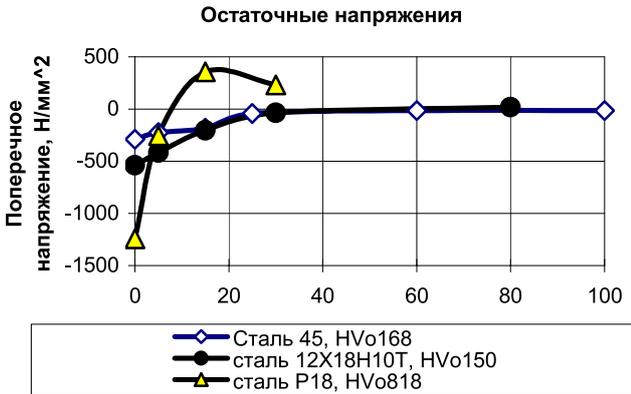


Рис. 6. Остаточные напряжения в поверхностном слое образцов.

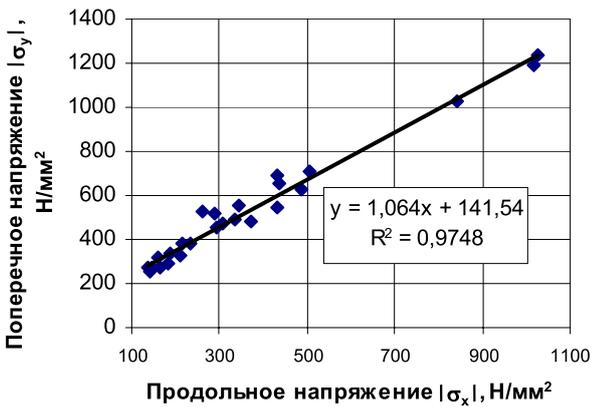


Рис. 7. Остаточные напряжения на поверхности трения образцов.

На рис. 8 показано распределение микротвердости HV в поверхностном слое образцов. Микротвердость определялась на приборе Lerlitz, нагрузка на пирамиду составляла 0,025 кгс. Из рис. 8 видно, что глубина упрочненного слоя ($HV > HV_0$) составляет величину порядка 15 мкм для отожженной стали 45 и 50 мкм для стали 12Х18Н10Т.

Анализ хода остаточных напряжений в поверхностном слое изношенных образцов (рис.6) позволяет не только идентифицировать глубину модифицированного слоя, но и определить природу процессов модифицирования. Известно [5], что изменение остаточных напряжений в поверхностном слое от сжимающих до растягивающих характерно

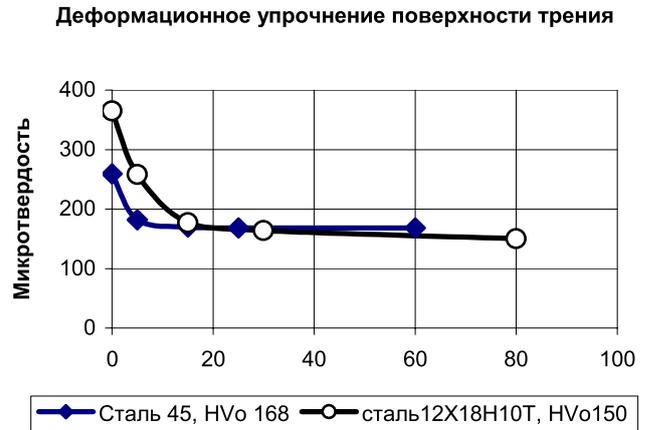


Рис. 8. Микротвердость в поверхностном слое образцов.

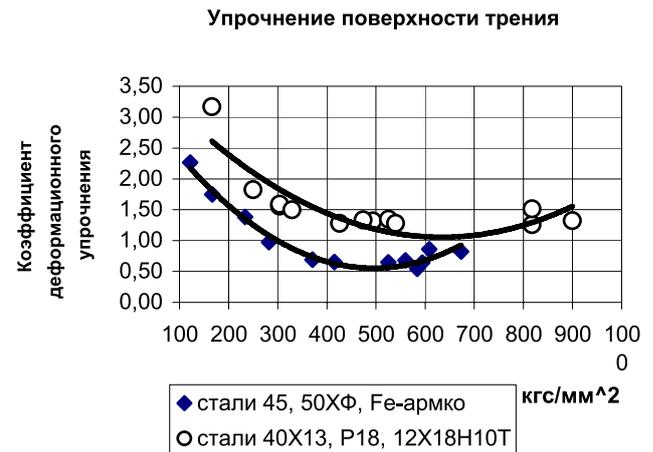


Рис. 9. Деформационное упрочнение стали при нагружении абразивом.

для слоев после пластической деформации механической природы, при отсутствии термического влияния.

В качестве коэффициента деформационного упрочнения использован показатель, равный отношению модуля поперечного остаточного напряжения к исходной твердости $|\sigma_y|/HV_0$ [7]. На рис. 9 показана зависимость коэффициента деформационного упрочнения от твердости образцов. Из рисунка видно, что склонность сталей к деформационному упрочнению имеет выраженный минимум в интервале твердости HV 500-600.

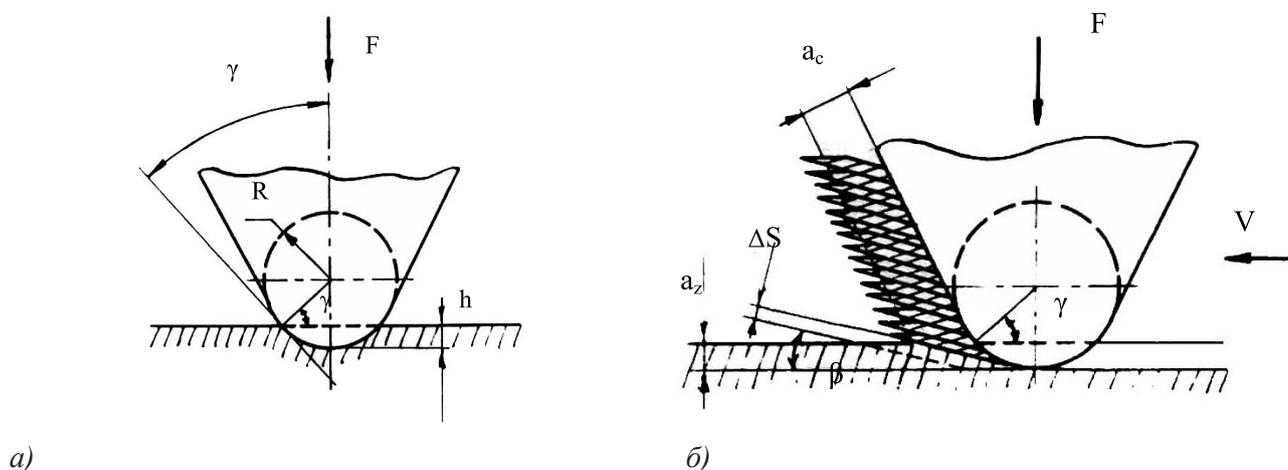


Рис.10. Схема формирования контакта металл-абразив при трибологическом нагружении в условиях микрорезания (а – этап внедрения частицы, б – этап перемещения частицы).

Дополнительная информация качественного и количественного характера о деформационном поведении сталей при изнашивании абразивом получена на основе исследования формирования контакта металл-абразив [8]. При микрорезании формирование контакта металл-абразив происходит поэтапно (рис. 10). На этапе внедрения абразивная частица формирует передний угол резания $\gamma = \arcsin(1-h/R)$. Для реализации микрорезания относительная величина внедрения должна быть $h/R > 0,1$ [9]. При относительном перемещении абразива, внедрившегося на глубину врезания a_z , формируется частица износа в виде стружки толщиной a_c , имеющей зоны сдвига толщиной ΔS и угол сдвига β .

На рисунке 11 показана микрофотография продуктов изнашивания отожженной стали 45. На фото отчетливо просматриваются зоны сдвига металла микростружки. Приведенная на рисунке 12 электронограмма продуктов изнашивания отожженной стали 45 имеет вид, характерный для металлических материалов с мелкодисперсной структурой аморфизированного металла [10].

Используя соотношения между β , γ , v , ΔS , полученные для шлифования [11], можно оценить скорость сдвига металла на контакте с абразивом при изнашивании в условиях микрорезания

$$\dot{\epsilon} = \frac{v}{\Delta S} \times \frac{\cos \gamma}{\cos(\beta - \gamma)},$$

где v – скорость относительного перемещения абразива (скорость скольжения).

Для граничных условий реализации микрорезания ($\gamma = -60^\circ$, $a_c/a_{zn} = 8$, $\beta = 3,2^\circ$) получены значения скорости сдвига $\dot{\epsilon}$ металла микростружки стали 45, представленные в таблице ниже:

Твердость металла HV	Толщина зоны сдвига $\Delta S \times 10^4$, мм	Скорость сдвига $\dot{\epsilon} \times 10^{-5}$, с ⁻¹
574	10	3,3
510	3,3	10,0
438	5,0	6,7
348	3,3	10,0
277	6,7	5,0
169	6,7	5,0

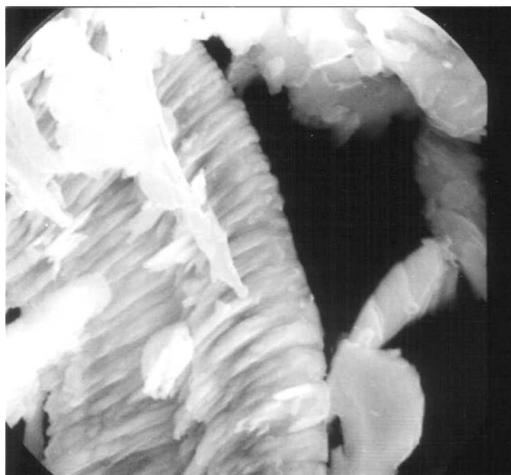


Рис. 11. РЭМ. Микрофотография продуктов изнашивания. Сталь 45, HV168 ($\times 6000$).

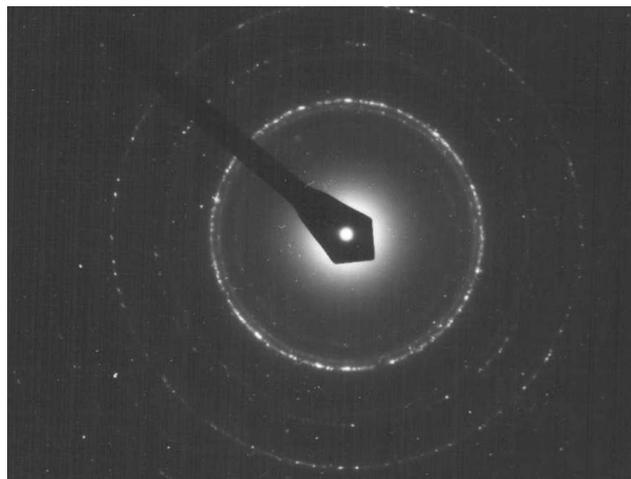


Рис. 12. Электронограмма продуктов изнашивания. Сталь 45, HV168.

Заключение

Приведенные результаты исследования морфологии поверхности трения и физико-механических свойств поверхностного слоя показывают, что модифицирование стали при изнашивании ($p = 1$ МПа, $v = 0,3$ м/с) в условиях микрорезания имеет деформационную природу. Коэффициент деформационного упрочнения сталей на поверхности трения составля-

ет 0,5-3,0. Распространение силового влияния зоны контакта по глубине составляет 15-50 мкм.

Продукты изнашивания формируются в условиях высокоскоростного сдвига ($\dot{\epsilon} = (3-10) \times 10^5$ с $^{-1}$). Микростружка представляет собой систему фрагментов с толщиной сдвига $(3,3-10) \times 10^{-4}$ мм и имеет мелкодисперсную структуру, характерную для аморфизированного металла.

Список литературы

1. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. М.: Наука, 1970. С.252.
2. Сорокин Г.М. Трибология сталей и сплавов. М.: Недра, 2000. С. 317.
3. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Исследование изнашивания металлов. М.: изд. АН СССР, 1960. С. 351.
4. Вашуль Х. Практическая металлография. Методы изготовления образцов. Пер. с нем. М.: Металлургия, 1988. С. 320.
5. Brinksmeier E. Randzonenanalyse geschliffener Werkstücke. Fortschr.-Ber. VDI-Z. Reihe 2, Nr. 50, 1982. S.145.
6. Krause H., Mathias M. Ein automatisierter Messplatz zur röntgenographischen Textur- und Spannungsermittlung. HTM, 1983, V. 38, Nr.3, S. 129-135
7. Сорокин Г.М., Краузе Н., Сафонов Б.П. и др. Об эволюции структурно-фазового состава сталей при воздействии абразива. Трение и износ, 1991. Т.12, №3, С. 396-402.
8. Сафонов Б.П. Научно-методические основы синтеза трибосистем применительно к изнашиванию сталей абразивом. Дис. д.т.н., М., РГУ нефти и газа, 1991. С. 448.
9. Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. С. 480.
10. Пинскер З.Г. Дифракция электронов. М.: изд. АН СССР, 1949. С. 404.
11. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование. Л.: Машиностроение, 1979. С. 246.