

*Д. И. ГОРИН,
кандидат технических наук*

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МЕТАЛЛА ПРИ АБРАЗИВНОМ ИЗНОСЕ

В процессе эксплуатации сельскохозяйственных машин, работающих в абразивной среде, износ поверхностей сопряженных деталей в результате трений происходит главным образом вследствие разрушающего действия находящихся между ними абразивных частиц, срезающих и деформирующих поверхностные слои металла. При наличии абразива износ представляет собой сумму микропроцессов резания твердыми абразивными частицами поверхностных слоев металла трущихся деталей, которым сопутствуют процессы микропластической деформации и упрочнения.

Абразивные частицы, попадая между трущимися поверхностями, вследствие наличия больших удельных давлений раздробляются, принимая самые разнообразные формы. Раздробленные абразивные частицы, как правило, представляют собой многогранники неправильной формы, вершины которых округлены.

Округления вершин у абразивных частиц придают последним большую механическую прочность, способствующую развитию значительных пластических деформаций поверхностного слоя металла. Абразивные частицы, находясь между поверхностями трения, с большим усилием перекатываются по поверхности трения, деформируя и упрочняя при этом верхние слои металла.

Путь скольжения абразивных частиц зависит от радиусов округления их вершин: чем больше эта величина, тем больше путь скольжения. Причем абразивные частицы, имеющие твердость выше твердости поверхности работающей детали, при соответствующем давлении внедряются (вдавливаются) в металл деталей сопряженной пары и в процессе перемещения срезают (сдвигают) некоторый микроробъем металла.

Врезание абразивных частиц и снятие ими стружки происходит в момент, когда напряжение от совместного действия тангенциального P_z и нормального P_y усилий при трении превысит предел прочности изнашиваемого металла. При этом сила P_z перемещает абразивную частицу по поверхности трения, а сила P_y прижимает

абразивную частицу к трущейся поверхности. Выражая отношение этих сил через углы абразивной частицы, получим

$$\frac{P_y}{P_z} = \frac{\sin \gamma + \mu \cos \gamma}{\cos \gamma - \mu \sin \gamma}, \quad (1)$$

где μ — коэффициент внутреннего трения деформированного металла в направлении плоскостей скольжения;

γ — фактически угол царапающей абразивной частицы.

Таким образом, увеличение переднего угла γ абразивной частицы приводит к увеличению отношения P_y к P_z , а следовательно, к увеличению степени разрушения и пластических деформаций верхних слоев металла. Учитывая, что характер разрушения поверхности зависит от геометрической формы абразивных зерен, возникающие при этом напряжения можно определить по следующей формуле

$$\sigma_m = \frac{P_y}{F} \left(\frac{1}{2} + \sqrt{1 + 4\mu^2} \right), \quad (2)$$

где

σ_m — максимальное напряжение, кг/мм²;

P_y — нормальная сила, кг;

F — площадь проекции отпечатка вдавленного зерна, мм²;

μ — коэффициент трения.

Радиус отпечатка можно определить по формуле

$$r = 1,1 \left[\frac{P_y \cdot r_1}{2} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \right]^{1/3}, \quad (3)$$

где

r — радиус отпечатка, мм;

P_y — нормальная сила, кг;

r_1 — радиус закругления зерна при вершине, мм;

E_1, E_2 — модули упругости абразивного зерна и стали.

Взаимодействие частиц способствует микрорельефу трущихся поверхностей.

В процессе проскальзывания и срезания стружки абразивной частицей имеет место наличие пластических деформаций, причем зоны пластических деформаций распространяются во все стороны от режущей частицы — впереди, по сторонам и ниже линии среза. Схематически это представлено на рис. 1.

Увеличение толщины снимаемого слоя a вызывает увеличение зоны, захватываемой пластической деформацией по всем направлениям, т. е.

$$K_1 > K; \quad v_1 > v; \quad l_1 > l.$$

Измерение микротвердости в сечениях поверхностных слоев показывает, что упрочнение поверхностей при наличии абразивных частиц достигает больших величин. При этом величина пластических деформаций в объемах $K_1 l$ и v неодинакова, обычно твердость и глубина деформированного слоя больше у передней поверхности

абразивной частицы, что видно из рис. 1, где в зоне непосредственного контакта частицы с металлом твердость увеличилась до $H=1075 \mu_{20}$. Глубина распространения пластических деформаций достигала в отдельных точках величины равной 0,22 мм.

Проведенные нами металлографические исследования деталей, работающих в абразивной среде, показывают, что на поверхностях трения имеется большое число царапин, причем профиль каждой из них определяется профилем абразивной частицы, нанесшей данную царапину (рис. 2). Следует заметить, что в условиях абразивного износа шероховатость трущихся поверхностей не является стабильной.

Явления, происходящие при абразивном износе, близки к явлениям, происходящим при шлифовании металлов. Можно считать, что абразивный износ в основном происходит по законам процесса шлифования металлов, разница только в том, что в шлифовальном круге абразивные зерна закреплены, а между трущимися поверхностями они

находятся в свободном состоянии. Однако абразивные частицы на поверхностях трения можно считать только условно свободными, так как в процессе работы они обычно внедряются и закрепляются в металле. одной из трущихся поверхностей, преимущественно более мягкой, и при этом условии начинают активно участвовать в изнашивании.

На рис. 3 показан момент срезания стружки абразивной частицей на поверхности пальца из стали 45 гусеничной цепи трактора ДТ-54.

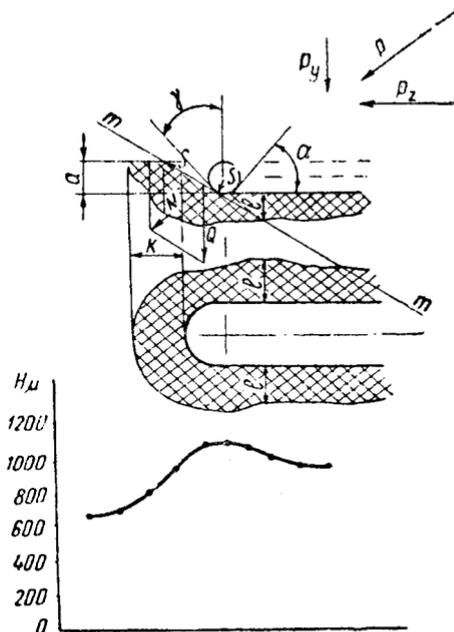


Рис. 1. Упрочнение металла при резании абразивной частицей

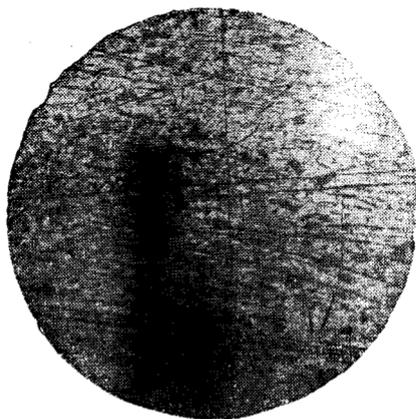


Рис. 2. Вид изношенной поверхности пальца. Увеличено в 210 раз

Очевидно, частица абразива, срезающая эту стружку, была недостаточно прочно закреплена в поверхностном слое металла проушины и при определенной величине усилий вырвана из связей.

В процессе работы некоторых деталей (например, палец и проушина звена гусеничной цепи трактора ДТ-54) имеет место неодн-

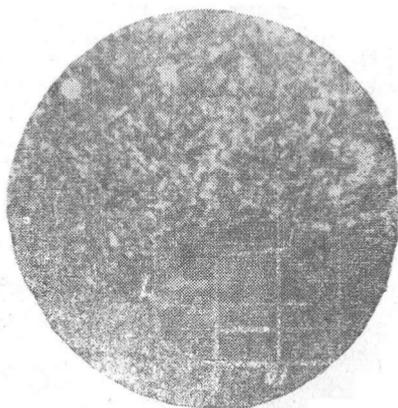


Рис. 3. Момент срезания стружки абразивной частицей. Увеличено в 600 раз

наковый износ поверхностей трения, выражающийся в наличии на них бугров и впадин.

При выявлении причин, вызывающих неравномерность износа и образования бугров, нами установлено, что бугры, как правило,

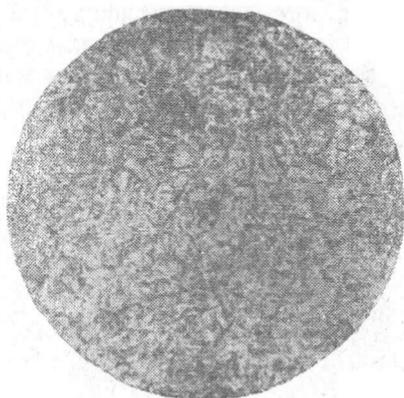
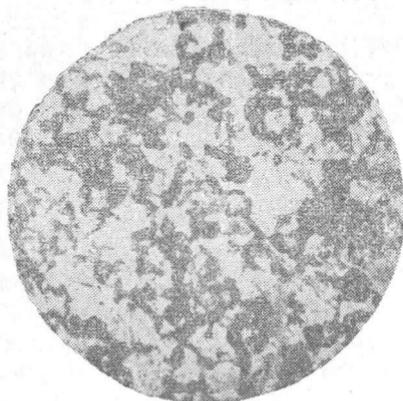


Рис. 4. Микроструктура изношенного пальца: а) выступов; б) впадин. Увеличено в 600 раз

имеют пониженную твердость, а прилегающие к ним участки (впадины) — более высокую твердость.

Металлографические исследования показали, что структура буг-

ров представляет собой в основном сорбит, а структура впадин — тростомартенит или мартенсит (рис. 4).

Неоднородная первоначальная твердость пальцев, а следовательно, и их структура обычно снижают износостойкость. Так, например, пальцы гусеничной цепи трактора ДТ-54, изготовленные из стали 45 твердостью в пределах $H_R = 46-52$, после вспашки трактором 85 га имели износ 144 г, в то время пальцы твердостью в пределах $H_{Rc} = 34-56$ имели в среднем износ 227 г, т. е. на 50—58% выше (рис. 5).

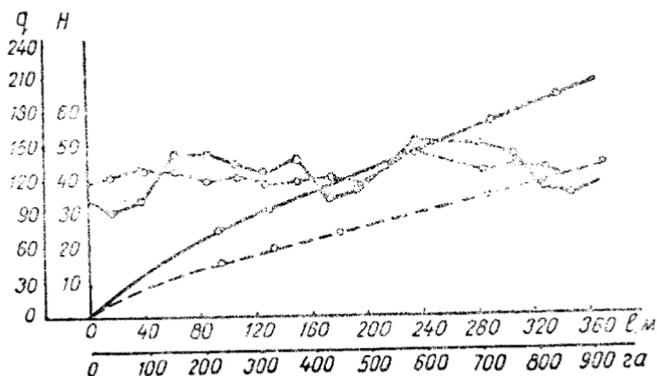


Рис. 5. Влияние равномерности закалки пальца на его износ

Однородная твердость пальца положительно влияет на уменьшение износа шарнира в целом. Нами экспериментально установлено, что твердость для деталей сопряженных пар, работающих в абразивной среде, не является показателем износостойкости.

Установлено, что абразивный износ так же, как и обычный, складывается из двух основных периодов ускоренного и установившегося. Величина ускоренного износа в основном зависит от качества обработки поверхностей деталей сопряженных пар, удельного давления и условий работы.

При сопряжении двух обработанных поверхностей соприкосновение их геометрических контуров, как правило, происходит по вершинам наиболее выступающих участков неровностей, образованных в процессе механической обработки.

Под действием внешней нагрузки выступы, входящие в контакт сопряженных поверхностей, деформируются.

При деформации выступов напряженное состояние отдельных частей внешних слоев металлов обычно является объемным, а так как при этом нагруженные объемы имеют весьма малые размеры, то последние деформируются в первую очередь, при этом сглаживание неровностей происходит неодинаково.

Так, у таких металлов, как баббит, сглаживание неровностей (выступов) в значительной степени происходит за счет их пласти-

ческих деформаций, тогда как у твердых закаленных металлов (сталь) сглаживание неровностей происходит как за счет их износа, так и за счет пластических деформаций.

Измерение микротвердости поверхностных слоев пальцев гусеничной цепи трактора ДТ-54 из стали 45 твердостью $H_{Rc} = 58-62$ показало, что они имеют значительные пластические деформации.

Детали обычно деформируются пластически под влиянием передаваемых ими сил, а поэтому износ металла на поверхностях трения таких деталей происходит уже после того, как металл предварительно деформирован (наклепан). При этом создаются значительные внутренние напряжения поверхностного слоя металла.

В настоящее время научные данные позволяют заявить, что наклепанный слой состоит из раздробленных кристаллических зерен, у которых межатомные связи значительно уменьшены, поэтому они начинают терять свои специфические свойства как кристаллические тела.

Следовательно, отрыву металлических частиц неизбежно предшествует переход их через фазу неустойчивого состояния.

Обычно при непосредственном соприкосновении и взаимном перемещении двух реальных тел поверхности их начинают пластически деформироваться. При многократном повторном воздействии нормальных сил и сил трения тончайшие поверхностные слои металла постепенно превращаются в хрупкие внутренне-напряженные корки, которые легко отслаиваются от основной массы трущихся тел. Этому также до некоторой степени способствует окисление поверхностного слоя в процессе пластических деформаций.

При соприкосновении двух реальных тел между ними возникают связи, аналогичные до известной степени их собственным межатомным связям. Движение одного тела по поверхности другого неизбежно сопровождается не только разрушением этих связей, но одновременным возникновением таких же связей в новых точках соприкосновения тел.

Известно, что современные технические металлы (сплавы) в твердом состоянии имеют кристаллическое строение и состоят из множества мельчайших кристаллических зерен, разделенных межкристаллическим веществом.

Атомы кристаллических зерен металла занимают в пространстве строго определенное положение, образуя кристаллическую решетку, расстояние между атомами измеряется в ангстремах и на 1 мкм кристаллических зерен приходится миллионы кристаллических плоскостей. Поэтому разрушение даже самых непрочных поверхностных связей неизбежно сопровождается относительным перемещением достаточно большого числа молекул.

Пластическая деформация, изменяя строение кристалла, нарушает нормальное расположение его атомов, соответствующее минимуму свободной энергии. При этом работа пластической деформации частично аккумулируется в виде потенциальной энергии искаженной решетки. Эта скрытая (латентная) энергия пластически

деформированного внутреннего граничного слоя металлических изделий отражается на их физических свойствах: твердости, хрупкости и др.

У каждого работающего изделия можно выделить поверхностный слой, структура которого, а следовательно, и все связанные с ней свойства отличаются от структуры и свойств основной массы металла.

Измеряя степень пластических деформаций поверхностного слоя беговой дорожки звена гусеничной цепи трактора ДТ-54 из стали 30СГ, по которой перекатываются опорные катки движителя, устанавливаем, что непосредственно под катящимся катком происходит пластическое сжатие, которое, постепенно уменьшаясь, переходит на некоторой глубине в упругие сжатия (рис. 6).

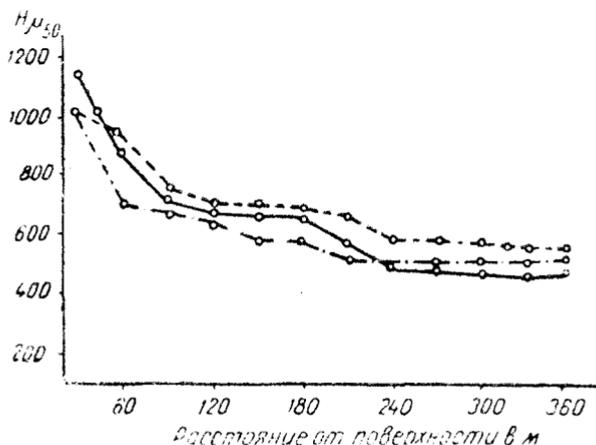


Рис. 6. Величина пластических деформаций беговой дорожки звена

В этом случае микротвердость поверхностного слоя достигает до $1120 H_{\mu,50}$ при исходной микротвердости дорожки, равной $400 H_{\mu,50}$. Глубина деформированного слоя достигает до $0,3 \text{ мм}$.

На интенсивность и величину износа большое влияние оказывает состав абразивной среды, так, например, износ пальцев гусеничной цепи трактора ДТ-54 из стали 45 на супесчаной почве был в среднем $0,00328 \text{ мм/га}$, тогда как износ таких же пальцев на мягком суглинке равнялся $0,00195 \text{ мм/га}$.

Возникающая при трении температура в поверхностных слоях трущихся металлов зависит главным образом от скорости скольжения, удельного давления и может быть различной, начиная от минимальной, мало влияющей на структуру поверхностных слоев металла, до критической, вызывающей резкие изменения микроструктуры (рис. 7).

Рассматривая кривые на рис. 7, можно видеть три характерные зоны: зону А, имеющую максимальную микротвердость поверхност-

ного слоя, равную $845\text{--}1009H_{\mu 50}$, что превышает исходную твердость на $174\text{--}338H_{\mu 50}$, зону *B*, имеющую микротвердость $353\text{--}450H_{\mu 50}$, что ниже исходной твердости на $221\text{--}318H_{\mu 50}$, и зону *C*, имеющую исходную микротвердость, равную $671H_{\mu 50}$. Глубина изменения микротвердости, образованная в процессе трения, достигла величины, равной $0,14\text{ мм}$.

Из анализа кривых и приведенных цифровых данных следует, что температура нагрева поверхностного слоя металла при тре-

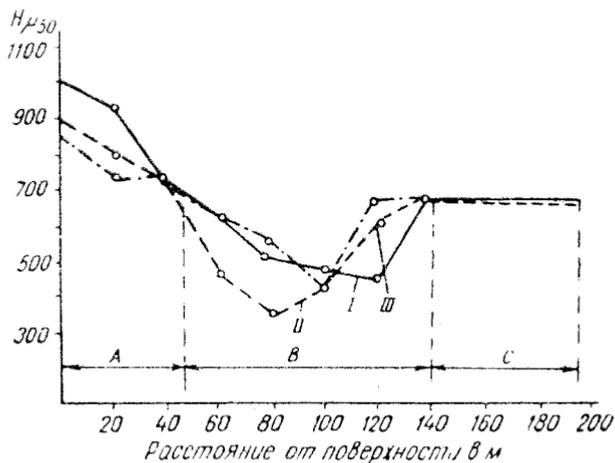


Рис. 7. Изменение твердости в поверхностном слое металла пальца

нии была выше критической точки, при которой произошли микроструктурные изменения.

Известно, что механические свойства различных металлов зависят от температуры нагрева; высокие температуры приводят к ослаблению внутренних связей, к изменению структурного и фазового состояния. В зависимости от температуры нагрева при трении, состава и термической обработки стали в поверхностных слоях могут происходить явления рекристаллизации, отпуска, закалки. Особенно тяжелые условия трения могут вызвать оплавления металла, что видно на рис. 8.

Исследования А. Д. Дубина показывают, что распределение температуры в глубины поверхностного слоя происходит по линейному закону и выражается:

$$T_y = T_0 - \frac{q}{2\lambda} y, \quad (4)$$

где

T_y — изменение температуры по глубине;

T_0 — максимальная температура на поверхности трения;

λ — теплопроводность металла;

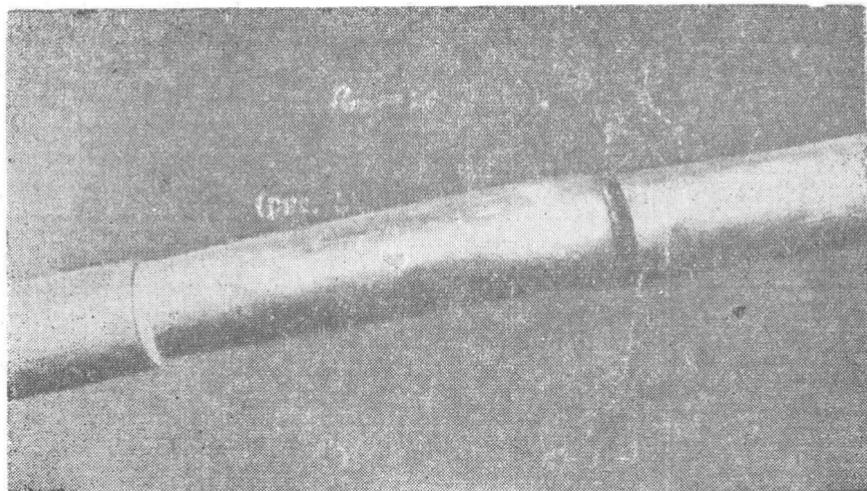


Рис. 8. Вид оплавления металла

q — количество тепла, вводимое в единицу времени;

Y — глубина возбуждения поверхностного слоя.

Глубину возбуждения поверхностного слоя можно выразить уравнением

$$Y = \frac{PV}{Af\beta_1 C_1 \Delta t \cdot T_0} - \frac{\beta_2 C_2 \delta_1}{\beta_1 C_1} \quad (5)$$

где

Y — глубина возбуждения поверхностного слоя;

P — сила трения, кг;

V — относительная скорость перемещения, м/сек;

A — механический эквивалент тепла $\doteq 427$ кгм/ккал;

f — площадь соприкосновения в единицу времени;

Δt — время;

C_1, C_2 — удельные теплоемкости;

δ_1 — толщина промежуточной среды;

β_1, β_2 — удельные веса металлов.

ВЫВОДЫ

Изменение свойств поверхностного слоя металла при абразивном износе в основном зависит от работы трения (удельного давления, скорости скольжения и др.), толщины промежуточной среды, физических характеристик металла трущейся пары и твердости абразивных частиц.

С увеличением твердости абразивных частиц интенсивность износа при прочих равных условиях возрастает. При абразивном износе

носе показатель твердости трущихся поверхностей деталей не характеризует износостойкость.

Более равномерная закалка поверхностей трения сопряженных деталей при абразивном износе увеличивает срок их службы.

При абразивном износе в малых активных объемах металла, расположенных у поверхностей трения, вследствие теплоты внешнего трения возникает высокая температура, приводящая к структурному изменению поверхностного слоя металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горин Д. И. Износ деталей в абразивной среде. Сборник научных трудов ВПИ, № 57. Изд. АН БССР, 1957.

2. Ребиндер П. А., Петрова Н. Н. Физико-химические основы явления износа трущихся поверхностей и смазки при высоких давлениях. Трение и износ в машинах, т. 1, 1939.

3. Дубинин А. Д. Трение и износ деталей машин. Машгиз, 1952.
