

МЕТОДИКА ВЫБОРА СТАЛЕЙ ДЛЯ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ СКОЛЬЖЕНИЯ ПО ЗАКРЕПЛЕННОМУ АБРАЗИВУ

*Коновалов А.В., Пичугин В.Ф., Елагина О.Ю.
РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина*

Изнашиванию в условиях скольжения по закрепленному абразиву подвергаются различные узлы и детали бурового оборудования и инструмента, рабочие части бульдозеров, экскаваторов, строительных машин широкого назначения, рабочие поверхности ходовой части гусеничных машин, работающих на промыслах. Диапазон изменения, как рабочих нагрузок, так и скоростей относительного перемещения абразивных частиц вдоль изнашивающихся поверхностей весьма широк. Для нефтегазовой отрасли характерными узлами, подверженными данному виду изнашивания, являются замки бурильных труб, насосно-компрессорные, буровые и обсадные трубы, калибраторы и расширители забойной части, корпуса бурильных коронок для отбора керна, а так же лопастные долота истирающе-режущего действия, элементы подъемно-транспортных горнорудных машин и др. Данный вид изнашивания характерен также для узлов и пар трения землеройной и сельскохозяйственной техники: ножи бульдозеров, клыки экскаваторов, режущие элементы культиваторов, рыхлителей, лемеха плугов и др.

Ведущим направлением повышения износостойкости в рассматриваемых условиях изнашивания является правильный выбор материала для изготовления узлов и деталей машин. Остро встает необходимость разработки расчетной, инженерной методики выбора сталей для оборудования, подвергающегося износу. Требуется, чтобы эта методика была достаточно проста именно в практическом применении.

Абразивное изнашивание – это сложный процесс в силу влияния на него многочисленных факторов, основными из которых являются механические свойства поверхности и абразива, нормальная нагрузка на контакте, размеры и форма абразивных частиц, скорость относительного перемещения. Роль вида, размера и формы абразива, влияние уровня нагрузки представлены в литературе достаточно широко. В тоже время исследованию влияния скорости перемещения на распределение нагрузок в зоне контакта абразив – деталь уделялось меньшее внимание. В процессе решения поставленной задачи мы обратились к рассмотрению этого на наш взгляд немало важного аспекта.

В настоящей работе проводится изучение влияния скорости относительного перемещения абразива и контактных нагрузок на характер деформаций, возникающих в поверхностном слое, и на глубину внедрения абразива в поверхность. Разрабатывается инженерная методика выбора сталей для условий изнашивания в присутствии закрепленных абразивных частиц.

Экспериментальное и расчетное определение контактных нагрузок при взаимодействии абразивной частицы с поверхностью детали

Процесс абразивного изнашивания закрепленным абразивом можно представить в виде внедрения жесткого сферического выступа в деформируемый материал (рис. 1).

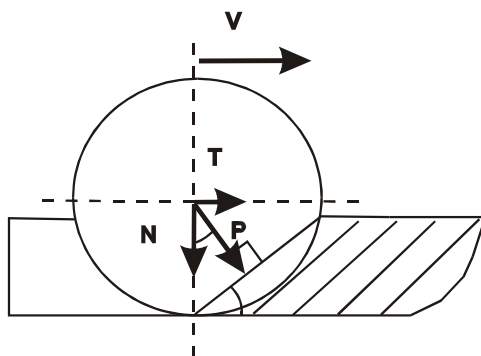


Рис. 1. Внедрение жесткого сферического выступа в деформируемый материал.

При этом на абразивную частицу действует нормально направленная сила N , определяющая силу прижатий абразива к поверхности детали, и тангенциально направленная сила T , характеризующая усилие, затрачиваемое на перемещение абразива по поверхности детали. Внедрение абразивной частицы в поверхностный слой происходит под действием суммарной силы P , направление действия которой отклоняется от перпендикуляра к поверхности детали на угол α . Суммарная сила P вычисляется следующим образом:

$$P = \sqrt{N^2 + T^2}. \quad (1)$$

Удельная мощность, затрачиваемая в единицу времени на перемещение единичного выступа по поверхности детали с заданной скоростью, распределяется на сообщение телу определенной кинетической энергии и преодоление работы трения:

$$N_{\text{уд}} = E_{\text{кин}} + A_{\text{с.тр.}}. \quad (2)$$

$$\text{При этом: } N_{\text{уд}} = T \cdot v; \quad E_{\text{кин}} = \frac{N \cdot v^2}{2 \cdot g}; \quad A_{\text{с.тр.}} = f \cdot N \cdot v. \quad (3)$$

Тогда из уравнения (2):

$$T \cdot v = \frac{N \cdot v^2}{2 \cdot g} + f \cdot N \cdot v. \quad (4)$$

Отсюда может быть найдена тангенциально направленная сила T :

$$T = \frac{N \cdot v^2}{2 \cdot g} + f \cdot N. \quad (5)$$

Увеличение скорости перемещения абразива должно приводить к росту тангенциально направленного усилия, что, в свою очередь, вызовет возрастание суммарной силы внедрения абразива в поверхность детали. А значит, следует ожидать интенсификацию процесса изнашивания поверхности в целом.

Таким образом, показано, что скорость перемещения оказывает влияние на формирование силового воздействия абразива в зоне контакта. С использованием зависимостей (1-5) были проведены расчеты суммарной нагрузки в контакте абразивной частицы с поверхностью детали.

Анализ зависимостей показывает, что возрастание скорости движения абразива приводит к увеличению суммарного силового воздействия на поверхность детали. Это вызывает увеличение глубины внедрения абразивного зерна в поверхность детали и приводит к постепенному переходу от пластического деформирования к процессу микрорезания на контакте. Что существенно повышает износ поверхности материала.

С целью подтверждения теоретических расчетов было проведено экспериментальное исследование силового взаимодействия между частицей абразива и поверхностью детали в зависимости от скорости относительного перемещения частицы. Для этого потребовалось разработать специальную установку, позволяющую провести измерения усилий в зоне контакта. С помощью силоизмерительного комплекса были получены зависимости изменения суммарного усилия на контакте от скорости перемещения для испытуемого материала – стали У8 разной твердости. Полученные экспериментальные данные сопоставлены с расчетными на рис. 2.

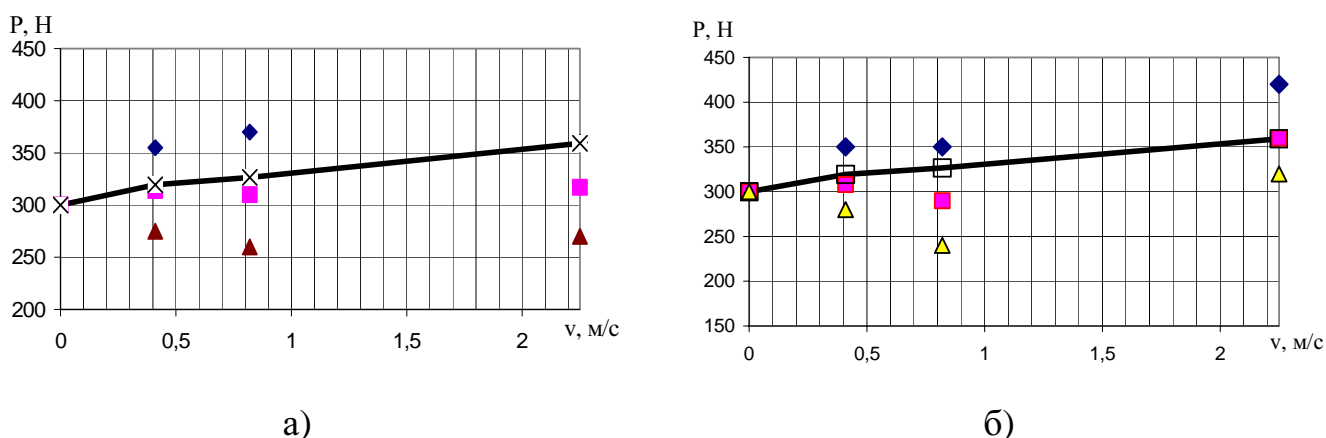


Рис. 2. Сравнение расчетных (сплошная черная линия) и экспериментальных зависимостей: а) – для образца твердостью 24 HRC; б) – для образца твердостью 45 HRC.

После обработки данных эксперимента, построенных по трем измерениям (рис. 2.), был найден средний коэффициент расхождения результатов расчета и эксперимента. Его величина оказалась равной порядка 4 - 10 %. Это говорит о хорошей сходимости результатов.

Экспериментальное и расчетное определение глубины внедрения абразивной частицы

Экспериментально, глубина внедрения шарового индентора, имитирующего абразивную частицу, в поверхность детали определялась на образцах с помощью контактного метода - прибора профилографа-профилометра. После тарировки прибора снимался профиль накатанной поверхности, и вычислялась глубина внедрения индентора. Было получено, что с увеличением скорости скольжения индентора по поверхности образцов и с увеличением усилия прижатия величина внедрения индентора увеличивается.

Расчетное определение глубины внедрения h было проведено согласно разработанной методике, заключающейся в следующем.

Использовалась модель внедрения жесткой сферы в пластическое полупространство, что позволило оценить зависимость площади контакта и величины внедрения частицы в поверхность от приложенной нагрузки и скорости взаимного перемещения элементов системы. Задача контакта сферического тела и плоской поверхности относится к контактным задачам для тел несогласованной формы, так как их первоначальный контакт при нулевой нагрузке осуществляется в точке. К такой задаче вполне могут быть применимы результаты теории Герца [6].

Контакт двух тел сферической формы (R_1 - радиус первого тела; R_2 - радиус второго тела), сжимаемых нагрузкой P , действующей по нормали к площадке контакта, обеспечивает ее формирование в виде круга радиуса a рис. 3.

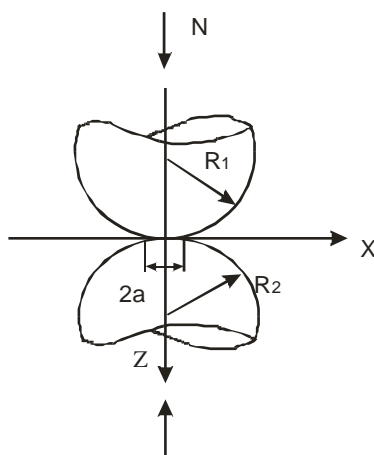


Рис. 3. Контакт двух тел сферической формы.

При этом максимальное давление в направлении действия прижимной нагрузки N превышает ее в 1,5 раза и определяется следующим образом:

$$P_z = \frac{3N}{2\pi a^2}, \quad [6] \quad (6)$$

Применяя указанную зависимость к случаю внедрения сферы в плоскую поверхность, считаем радиус второго тела равным нулю.

Эпюра давлений на площадке контакта представляет собой полусферу с радиусом r , максимальное давление в которой достигается по центру площадки контакта в направлении оси z , совпадающей с направлением действия силы N рис. 4.

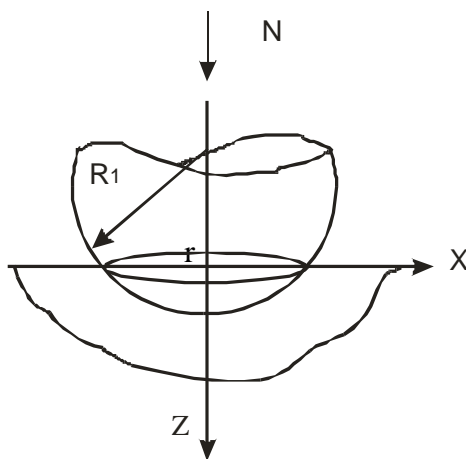


Рис. 4. Контакт сферического индентора с упругим телом.

При этом:

$$P_z = \frac{3N}{2\pi r^2}, \quad [6] \quad (7)$$

Нагрузка, при которой возникает пластическое течение материала поверхности, определяется пределом текучести и возникает в тот момент, когда максимальное контактное давление достигает критической величины, равной, согласно критерию Треска, $1,6 \sigma_{0,2}$ [6].

Наличие тангенциальных сил в зоне контакта смещает точку, где впервые возникло пластическое течение в сторону движения жесткого индентора и приближает ее к поверхности.

Зависимость максимального давления на контакте, вызывающего пластическое течение и отнесенного к напряжению текучести при сдвиге, от коэффициента трения представлено на рис. 5 [8].

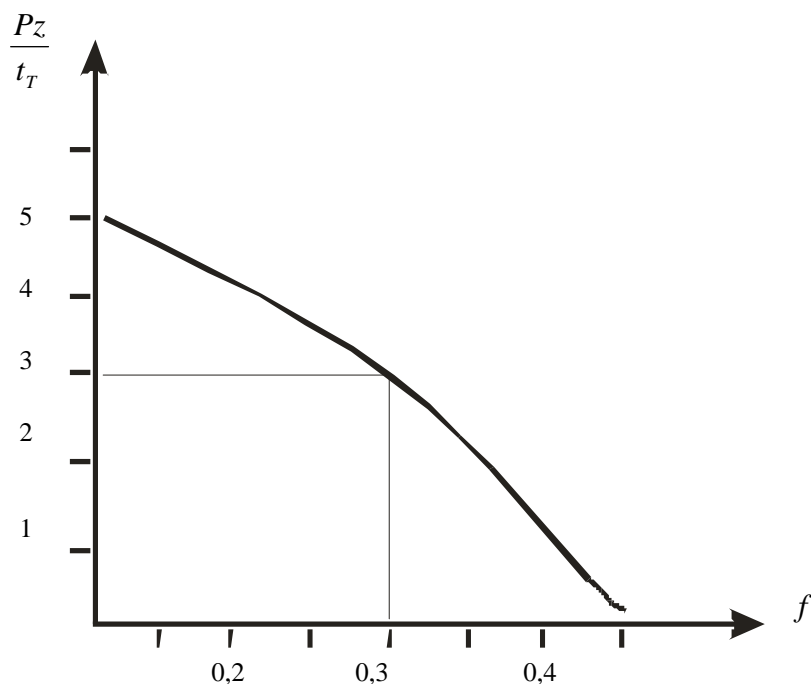


Рис. 5 Зависимость отношения максимального давления на контакте P_z к напряжению текучести при сдвиге t_T от коэффициента трения f .

При коэффициенте трения равном 0,3 отношение P_z к t_T равно 3. Подставляя это значение в формулу 7, получаем:

$$P_z = \frac{3N}{2\pi r^2} = 3t_T = \frac{3}{2}\sigma_{0,2}, \quad (8)$$

Отсюда:

$$P_z = \frac{N}{\pi r^2} = \sigma_{0,2}. \quad (9)$$

Учитывая тот факт, что максимальное давление достигается в направлении оси z , совпадающей с направлением действия деформирующего усилия, заменим нормально направленную нагрузку N на суммарное усилие P :

$$P_z = \frac{\sqrt{N^2 + T^2}}{\pi r^2} = \sigma_{0,2}. \quad (10)$$

Наличие тангенциальных сил в зоне контакта существенно изменяет формирование фактической площади контакта при скольжении. Так, при идеальных пластических деформациях в зоне контакта, касание индентора с деформированным материалом происходит только по фронтальной по направлению скольжения поверхности. В связи с этим, фактическая площадь касания при скольжении связана с фактической площадью касания при статическом внедрении индентора следующим соотношением:

$$A_{ск} = \frac{1}{2} A_{ст}. \quad (11)$$

Отсюда:

$$P_z = \frac{2\sqrt{N^2 + T^2}}{\pi r^2} = \sigma_{0,2}. \quad (12)$$

Заменяя радиус площадки контакта на глубину внедрения, получаем следующее выражение для определения геометрических характеристик зоны контакта «абразивная частица – поверхность детали».

Из геометрических соотношений: $\pi r^2 = 2\pi R h$, отсюда: $r^2 = 2R h$. Подставляя это значение и выражение для определения тангенциальной составляющей силы нагружения (формула 5) в формулу 12, получаем:

$$\frac{\sqrt{N^2 + T^2}}{\pi R h} = \sigma_T, \quad h = \frac{\sqrt{N^2 + \left(\frac{Nv}{2g} + fN\right)^2}}{\pi R \sigma_{0,2}}, \quad (13)$$

Таким образом, предложено выражение для определения глубины внедрения абразива при его скольжении относительно поверхности детали в зависимости от усилия на контакте и скорости относительного перемещения и показано, что основной механической характеристикой, определяющей изменение глубины внедрения абразивной частицы в поверхность детали, является предел текучести материала детали.

Согласно зависимостям 6-13 проводился расчет глубины внедрения индентора. Результаты расчета представлены и сопоставлены с экспериментальными данными на рис. 6 для стали У8 (НВ=200).

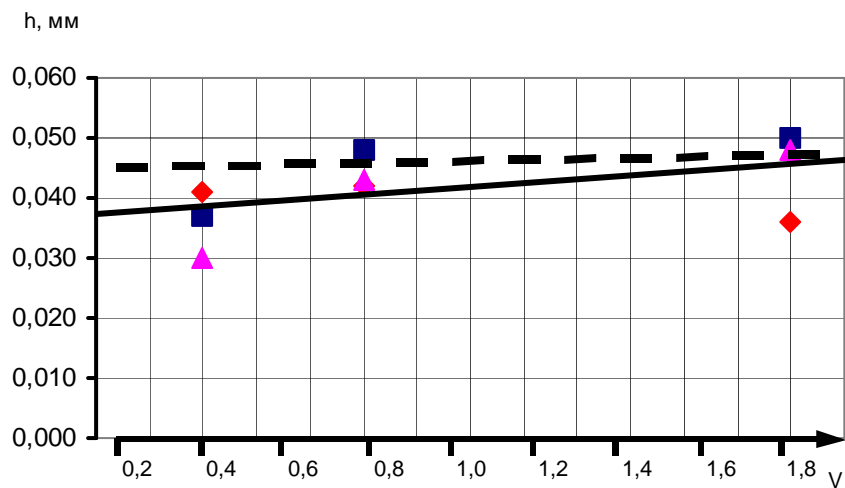


Рис. 6. Сравнение расчетной (пунктирная линия) и экспериментальной (сплошная линия) величины внедрения h шарового индентора, построенной по трем точкам в зависимости от скорости перемещения индентора для стали У8 (НВ = 200)

В результате сравнения расчетной и экспериментальной величины внедрения, можно сделать вывод, что погрешность между значениями глубины внедрения, рассчитанной по предложенной методике и значениями глубины внедрения, полученной в процессе эксперимента имеет величину 5 – 8 %. Это подтверждает возможность использования предложенной методики для расчета глубины внедрения индентора в поверхность детали при скольжении в широком диапазоне контактных нагрузок.

В результате проведенного анализа экспериментальных и расчетных исследований установлена достаточно точная корреляция предложенных зависимостей по определению величины контактной нагрузки и глубины внедрения от скорости относительного скольжения абразивной частицы. Установлено, что увеличение скорости перемещения зерна абразива относительно поверхности детали соответственно повышает величину тангенциальной составляющей, а значит и суммарной, контактной нагрузки, действующей перпендикулярно площадке контакта. В конечном счете, возрастание суммарной контактной нагрузки приводит к появлению пластических деформаций в поверхностном слое материала с последующим переходом к микрорезанию. О чем свидетельствуют исследования, проведенные по определению глубины внедрения. Так как глубина внедрения тесно связана с износом поверхности, то можно утверждать, что увеличение скорости относительного перемещения приводит к возрастанию линейного износа рабочих поверхностей. Следовательно, для прогнозирования ресурса работы деталей нефтегазового оборудования необходимо учитывать влияние скорости относительного перемещения.

***Методика расчета предельно допустимых параметров нагружения
различных сталей для их использования в условиях скольжения
по закрепленному абразиву***

На основе проведенного исследования была разработана методика, которая позволяет оценить возможность использования той или иной стали для изготовления деталей, работающих в условиях скольжения по закрепленному абразиву, на основании установления ведущего вида деформаций в зонах контакта абразива и поверхности детали, в соответствии с диаграммой линий равной износостойкости. Методика предназначена для специалистов в области испытаний материалов на изнашивание, для оценки интенсивности изнашивания сталей, работающих при трении в присутствии закрепленного абразива.

С помощью методики составляются рекомендации по оценке износостойкости (интенсивности изнашивания) сталей на основании разработанной диаграммы линий равной износостойкости.

Следует отметить, что применение расчетных зависимостей ограничивается только областью установившегося движения поверхностей трения относительно закрепленного абразива, и не рассматриваются переходные области (пуск и остановка машины или узла, приложение и снятие нагрузки и др.). Разработанные диаграммы линий равной износостойкости выбранного диапазона сталей служат для качественной оценки стойкости поверхностей деталей в условиях скольжения при абразивном изнашивании.

Основные величины, необходимые для построения диаграммы линий равной износостойкости, следующие: удельные нагрузки на контакте поверхности детали с абразивом; скорость относительного перемещения абразива или скорость скольжения поверхности вдоль закрепленного абразива (v); твердость стали (НВс) и твердость абразива (НВа); предел текучести стали ($\sigma_{0,2}$); относительное удлинение (l_0); модуль упругости стали (E); коэффициент трения в контакте (f); радиус частиц абразива – (R).

Построение диаграммы линий равной износостойкости выполняется в следующем порядке. Задаются или находятся следующие величины:

- диапазон возможных нагрузок в контакте поверхности детали с абразивом в Ньютонах;
- диапазон возможных скоростей, м/с;
- диапазон радиусов абразивных частиц, мм.

Устанавливаются характеристики стали:

- твердость НВ, МПа;
- предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа;
- относительное удлинение l_0 .

Находим линии равной износостойкости, разграничивающие на диаграмме области упругой, упруго-пластической, пластической деформации и микрорезания.

Для этого выражаем значение контактной нагрузки N от отношения $\left(\frac{h}{R}\right)$ из формулы 13, получаем:

$$N = \frac{\pi \left(\frac{h}{R}\right) R^2 \sigma_{0,2}}{\sqrt{1 + \frac{v^2}{4g} + \frac{vf}{g} + f^2}}. \quad (14)$$

где $\left(\frac{h}{R}\right)$:

для линии перехода упругой деформации в упруго-пластическую, согласно [6] –

$$\left(\frac{h}{R}\right) = 0,24(1 - \mu^2)^2 \left(\frac{HB}{E}\right)^2; \quad (15)$$

для линии перехода упруго-пластической деформации в пластическую, согласно [6] –

$$\left(\frac{h}{R}\right) = 5,4(1 - \mu^2)^2 \left(\frac{HB}{E}\right)^2; \quad (16)$$

для линии перехода пластической деформации в микрорезание, согласно [6] –

$$\left(\frac{h}{R}\right) = \frac{l_0}{2} \frac{1 - \frac{2HB}{\sigma_{0,2}} f}{1 + \frac{2HB}{\sigma_{0,2}} f}. \quad (17)$$

Для построения линий диаграммы подставляем критические значения величины $\left(\frac{h}{R}\right)$, соответствующие точкам перехода из одного вида деформаций в другой, и отображаем на диаграмме линии равной износостойкости и, соответственно, области деформации.

После построения диаграммы ведется анализ и дается оценка работоспособности узла трения. Для этого необходимо знать условия нагружения, то есть условия эксплуатации детали: величину нагрузки, N ; скорости скольжения, m/s ; площадь контактной поверхности, mm^2 ; преимущественный диаметр абразивных частиц R , mm , и механические характеристики выбранной для данных условий нагружения стали (твердость HB , $MПа$; предел текучести $\sigma_{0,2}$, $MПа$; относительное удлинение l_0).

Находится суммарная контактная нагрузка с использованием следующей зависимости:

$$P_{\Sigma} = \sqrt{N^2 + \frac{Nv}{2g} + fN}, \quad (18)$$

где: N – нормальная нагрузка, H ;
 v – скорость скольжения, m/s ;
 f – коэффициент трения.

Находится величина глубины внедрения абразивных частиц при данных условиях нагружения по следующей зависимости:

$$h = \frac{\sqrt{N^2 + \left(\frac{Nv}{2g} + fN\right)^2}}{\pi R \sigma_{0,2}} = \frac{P_{\Sigma}}{\pi R \sigma_{0,2}}. \quad (19)$$

Находится отношение глубины внедрения h к радиусу абразивных частиц R - $\left(\frac{h}{R}\right)$. Полученное значение величины $\left(\frac{h}{R}\right)$ сравнивается с граничными значениями величины $\left(\frac{h}{R}\right)$ и устанавливается область деформации, в которой работает трущаяся поверхность детали.

Пример диаграммы линий равной износостойкости представлен на рис. 7 для стали У8 (Основные механические свойства: $HВ = 380$ МПа, $\sigma_{0,2} = 380$ МПа, $l_0 = 0,25$).

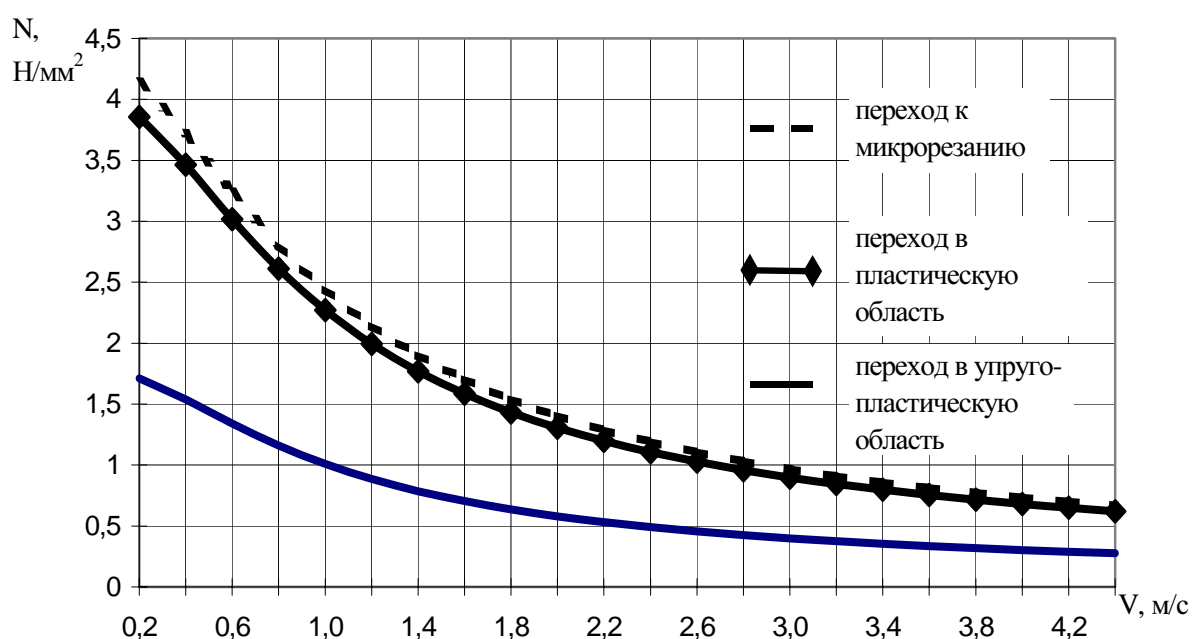


Рис. 7. Диаграмма линий равной износостойкости для стали У8 ($HВ=380$).

Зная величину суммарной нагрузки в зоне контакта, скорость скольжения поверхности относительно абразива, отмечаем на диаграмме область, в которой будет работать стальная поверхность в данных условиях нагружения.

Зная вид деформаций можно судить о долговечности и прогнозировать ресурс работы детали в данных условиях и режимах. Качественно судим о возможности и целесообразности использования выбранной стали в данных условиях эксплуатации.

Список литературы

1. Тененбаум М. М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин при абразивном изнашивании. М.: Машиностроение, 1966. 321 с.
2. Сорокин Г. М. О критериях выбора износостойких сталей и сплавов// Заводская лаборатория, 1991, № 9. С. 55-59.
3. Сорокин Г. М. Трибология сталей и сплавов. Учебн. для вузов. – М.: ОАО «Издательство «Недра», 2000. – 317 с.
4. Михин Н. М. Внешнее трение твердых тел. М.: Наука, 1977. 221 с.
5. Львов П. Н. Абразивный износ и защита от него. М.: ЦБТИ. 1959. - 55с.
6. Крагельский И. В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968, - 480с.
7. Кащеев В. Н. Абразивное разрушение твёрдых тел. М.: Наука, 1970, - 248с.
8. Доценко В. А. Изнашивание твердых тел. М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1990. – 192 с.
9. Абразивное изнашивание газопромыслового оборудования/ В. И. Бирюков, В. Н. Виноградов, М. М. Мартиросян, В. Н. Михайлычев, М.: Недра, 1977. - 206 с.
10. Погодаев Л. И., Кузьмин В.Н., Дудко П. П. Повышение надежности трибосопряжений. С-Пб.: Академия транспорта Российской Федерации, 2001. – 304 с.: ил.
11. Основы трибологии (трение, износ, смазка): Учебник для технических вузов. 2-е изд. переработ. и доп. / А. В. Чичинадзе, Э. Д. Браун, Н. А. Буше и др.; Под общ. Ред. А. В. Чичинадзе. - М.: Машиностроение, 2001. – 664 с., ил.