



«Новые методы определения твёрдости материалов»

Лекция 31

Lec_31_metod_opr_tverd_3MC_LNA_15_12_2015

Влияние формы индентора на зависимость «нагрузка–глубина внедрения» для стали средней твердости (образец №2)

**Профессор Мощенок В.И.
Доцент Лалазарова Н.А.**

Содержание

★ 31.1. Соотношение зависимостей «нагрузка—глубина внедрения» для разных пар инденторов и твердости образцов

★ Список литературы к лекции 31

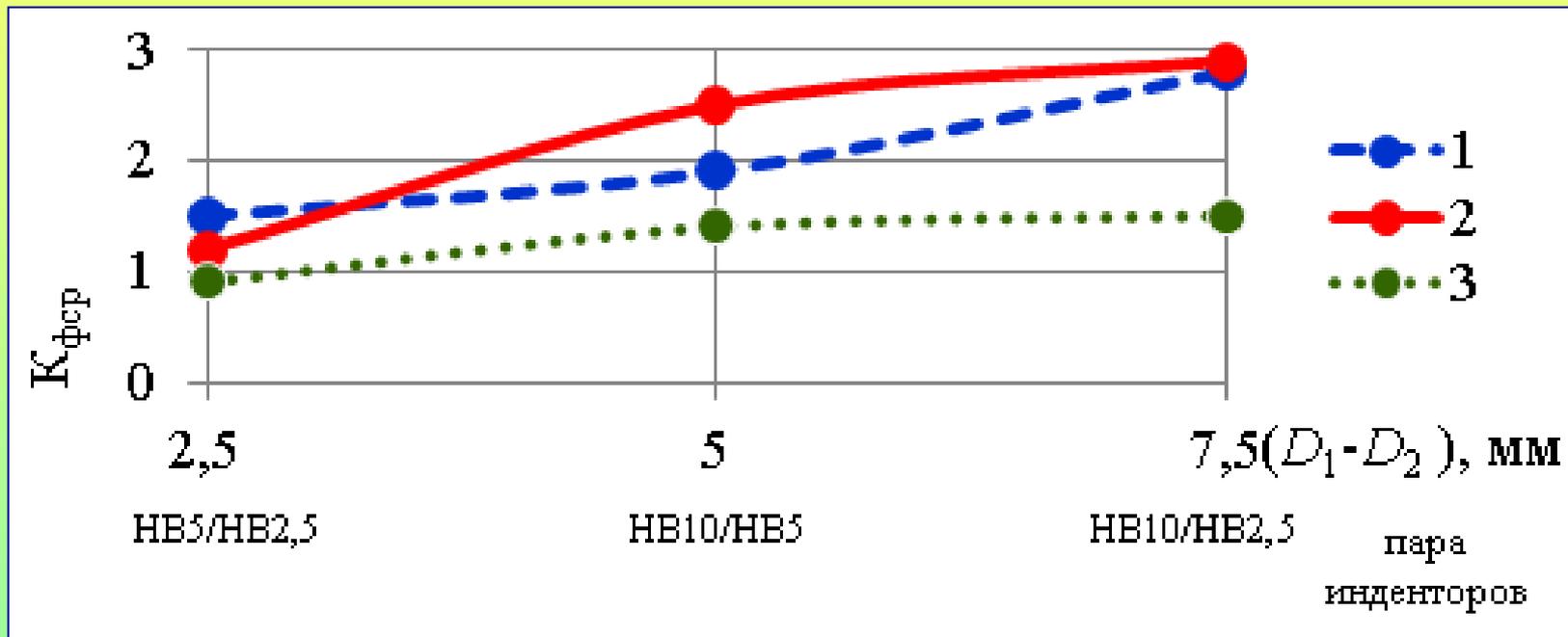
★ Контрольные вопросы

★ Задания для самостоятельной работы



31.1. Соотношение зависимостей «нагрузка—глубина внедрения» для разных пар инденторов и твердости образцов

На рис. приведены графики зависимости $K_{ф.ср.}$ разных пар инденторов для сталей разной твердости. Графики на этих рисунках построены по одним и тем же данным, но в разной системе координат.

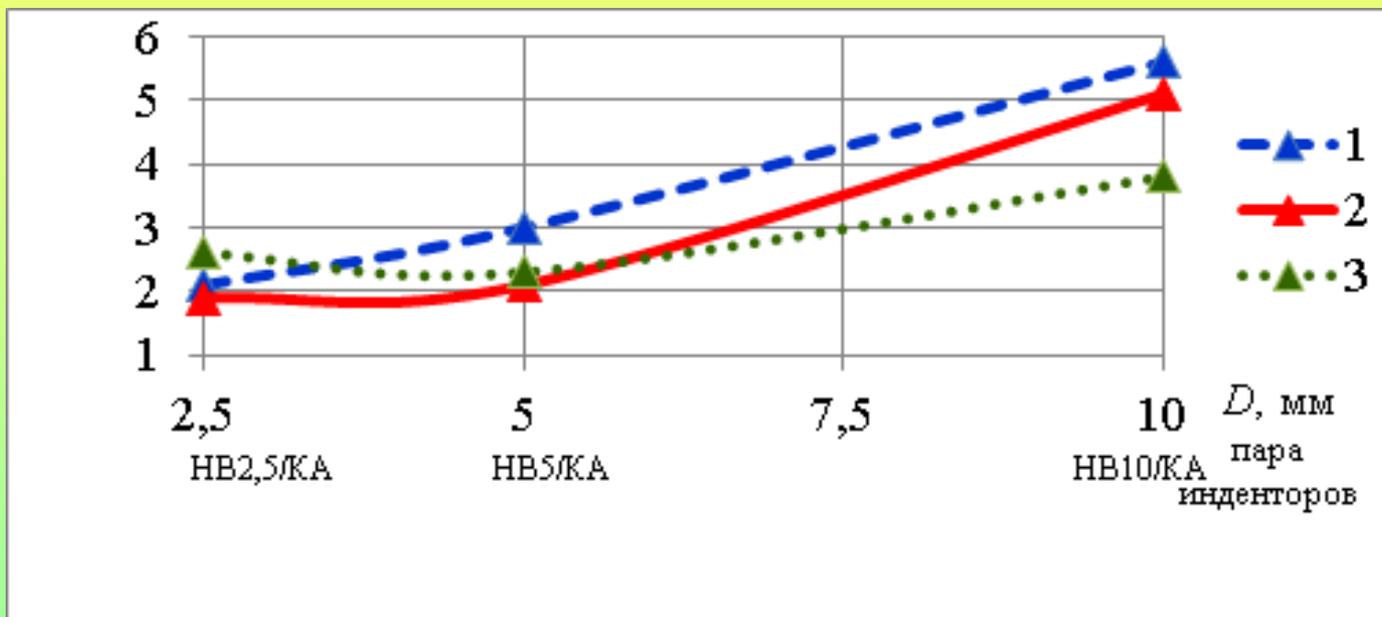


а

Зависимость $K_{ф.ср.}$ разных пар инденторов от их геометрии для сталей низкой (1), средней (2) и высокой (3) твердости: а – HV/HV

Соотношение зависимостей «нагрузка—глубина внедрения» для разных пар инденторов и твердости образцов

На рис. приведены графики зависимости $K_{ф.ср.}$ разных пар инденторов для сталей разной твердости. Графики на этих рисунках построены по одним и тем же данным, но в разной системе координат.

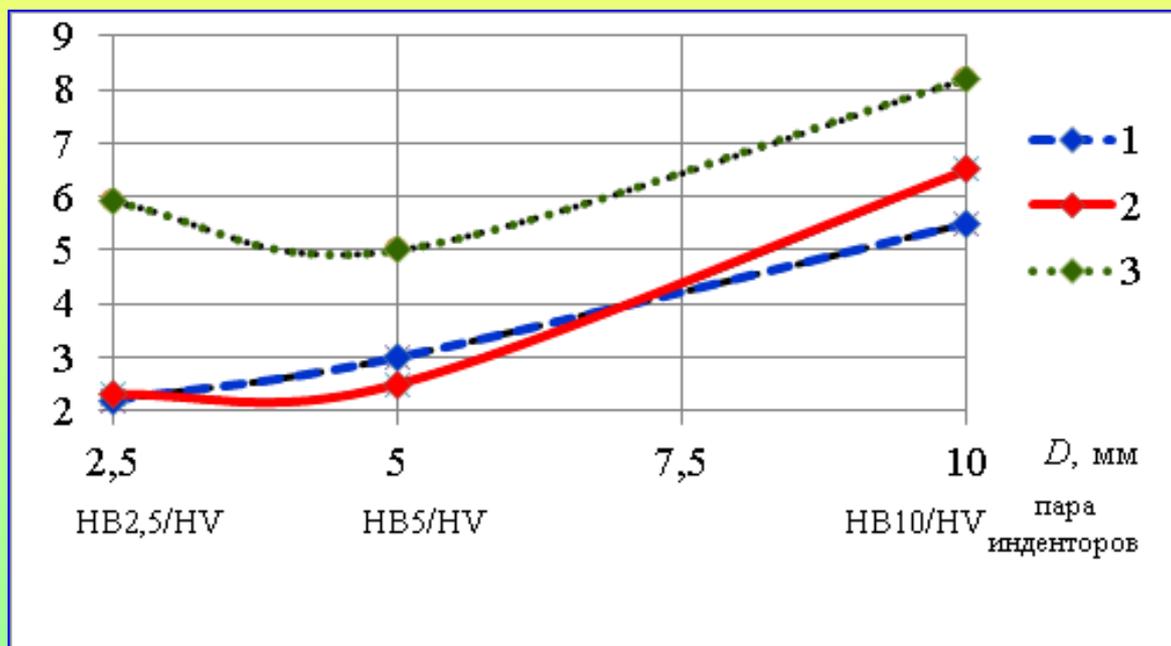


б

Зависимость $K_{ф.ср.}$ разных пар инденторов от их геометрии для сталей низкой (1), средней (2) и высокой (3) твердости: б – HV/КА

Соотношение зависимостей «нагрузка—глубина внедрения» для разных пар инденторов и твердости образцов

На рис. приведены графики зависимости $K_{ф.ср.}$ разных пар инденторов для сталей разной твердости. Графики на этих рисунках построены по одним и тем же данным, но в разной системе координат.



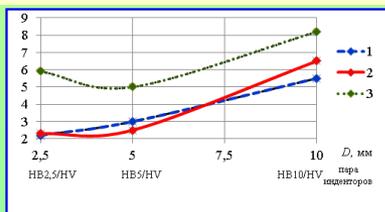
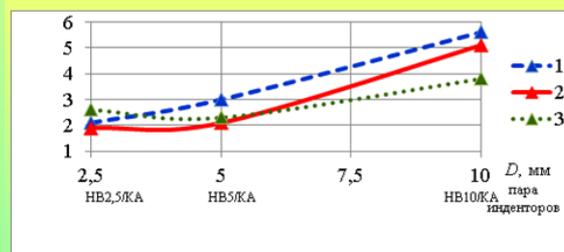
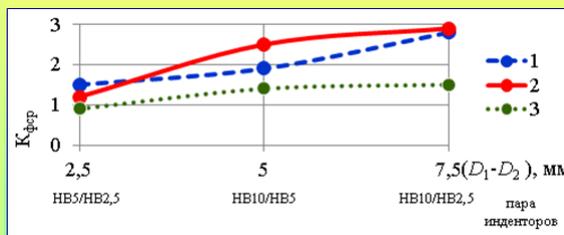
В

Зависимость $K_{ф.ср.}$ разных пар инденторов от их геометрии для сталей низкой (1), средней (2) и высокой (3) твердости: v – HB/HV

Соотношение зависимостей «нагрузка—глубина внедрения» для разных пар инденторов и твердости образцов

Приведенные рисунки показывают, что зависимость $K_{ф.ср.}$ от геометрии пар инденторов и твердости, а также исследованная ранее зависимость $K_{ф.ср.}$ от глубины внедрения индентора имеют сложный характер. Можно предположить, что значительную роль при этом играют силы трения.

Известно, что при определении твердости по Бринеллю происходит скольжение испытуемого металла относительно поверхности индентора.



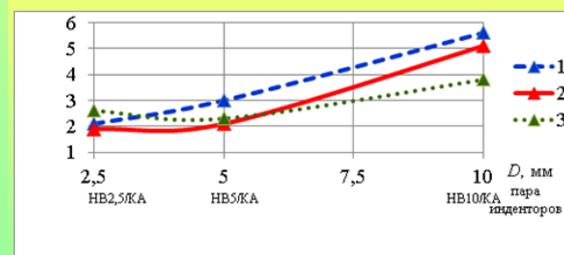
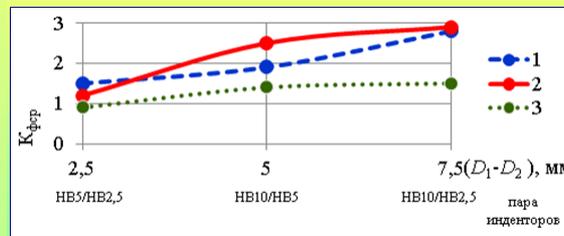
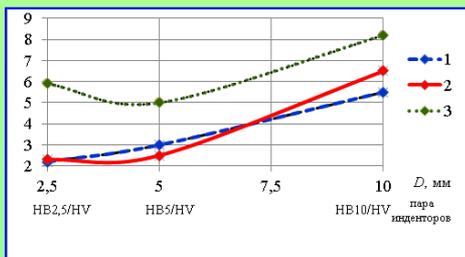
В этом случае большую роль играют силы трения между поверхностями деформируемого металла и шара.

Аналогичное влияние трения наблюдается и при вдавливании конуса и пирамиды.

Соотношение зависимостей «нагрузка—глубина внедрения» для разных пар инденторов и твердости образцов

Влияние трения сводится к тому, что оно существенно изменяет напряженное состояние, по крайней мере, в слоях деформируемого металла, близких к поверхности контакта, и определяет величину и

распределение нормальных напряжений по контактной поверхности,



равнодействующая которых составляет усилие, необходимое для осуществления процесса вдавливания.

Таким образом, трение повышает твердость металла.

Соотношение зависимостей «нагрузка—глубина внедрения» для разных пар инденторов и твердости образцов

В ряде работ отмечается, что коэффициент трения между штампом и металлом при пластической деформации значительно отличается по численной величине от обычного коэффициента трения скольжения, при котором скользящая поверхность не подвергается существенным физическим изменениям.

Наоборот, в первом случае вследствие увеличения трущейся поверхности и отчасти под влиянием наклепа поверхностного

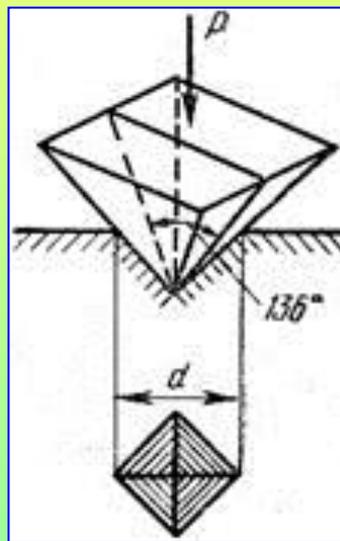
слоя в соприкосновение со штампом вступают все новые и новые группы кристаллов.

Согласно существующим в настоящее время представлениям, коэффициент трения при пластическом деформировании рассматривается как сумма двух составляющих: деформационной составляющей и составляющей, обусловленной силами адгезии

Соотношение зависимостей «нагрузка—глубина внедрения» для разных пар инденторов и твердости образцов

Силы трения в зоне контакта конуса или пирамиды с испытуемым материалом намного больше, чем в случае шара. Уменьшение угла конуса, особенно при $2\phi < 120^\circ$ приводит к существенному увеличению сил трения, оказывающих влияние на твердость.

Поскольку угол при вершине конуса меньше, чем при вершине пирамиды, очевидно, силы трения при вдавливании конуса будут больше, чем при вдавливании пирамиды.



Таким образом, увеличение остроты индентора приводит к увеличению сил трения.



Можно предположить, что при вдавливании шарика силы трения будут зависеть от диаметра шарика, увеличиваясь с его уменьшением.

Соотношение зависимостей «нагрузка—глубина внедрения» для разных пар инденторов и твердости образцов

В порядке возрастания сил трения в контакте индентора с испытуемым материалом инденторы можно расположить следующим образом: шарик \varnothing 10 мм, шарик \varnothing 5мм, шарик \varnothing 2,5 мм, алмазная пирамида, алмазный конус.

Относительно влияния степени деформации и нагрузки на коэффициент трения при вдавливании индентора существуют противоречивые мнения.



Одни авторы считают, что с увеличением степени деформации в лунке, то есть с увеличением d/D (или h) коэффициент трения снижается, другие авторы придерживаются противоположной точки зрения.

По нашему мнению, более вероятным является **увеличение** коэффициента трения с ростом степени деформации в связи с тем, что **большие пластические деформации в лунке существенно увеличивают деформационную составляющую силы трения.**

Соотношение зависимостей «нагрузка—глубина внедрения» для разных пар инденторов и твердости образцов

Силы трения и их распределение по контактной поверхности в большой степени зависят от механических свойств деформируемого металла и от тех изменений, в том числе и локальных, которые произошли в процессе деформации.

С повышением твердости коэффициент трения снижается в связи с уменьшением доли пластической деформации и склонности к адгезии.

Можно предположить, что чем меньше коэффициент трения индентора в контакте с испытуемой поверхностью, тем больше будет его снижение с повышением твердости, и оно будет существенно зависеть от геометрии индентора.

Вероятно, с увеличением остроты индентора силы трения с повышением твердости будут уменьшаться в меньшей степени, т.е. при высокой твердости f больше всего снизится для шарика $\varnothing 10$ мм и меньше всего для конуса.

Соотношение зависимостей «нагрузка—глубина внедрения» для разных пар инденторов и твердости образцов

Таким образом, на величину сил трения в контакте индентора с испытываемой поверхностью оказывает влияние геометрия индентора, степень деформации при вдавливании и твердость исследуемого материала.

Увеличение остроты индентора и степени деформации повышает коэффициент трения, а, следовательно, увеличивается усилие, необходимое для внедрения индентора на определенную глубину.

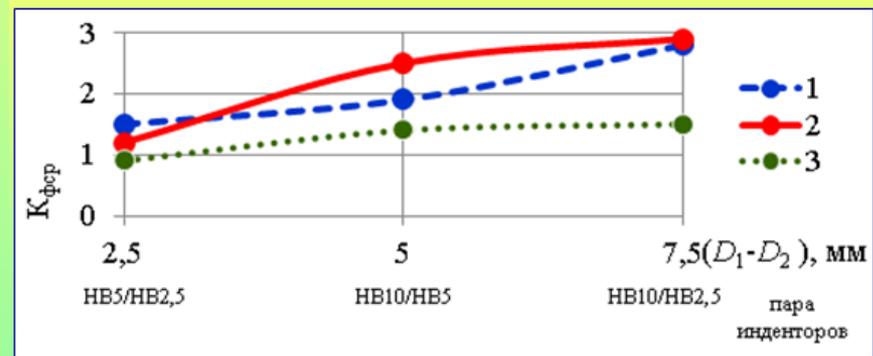
Повышение твердости исследуемого материала, наоборот, уменьшает коэффициент трения, а, значит, способствует уменьшению усилия, необходимого для внедрения индентора на данную глубину.

Сложный характер зависимости коэффициента формы от геометрии инденторов, глубины их внедрения и твердости испытываемого материала, вероятно, и объясняется большим и неоднозначным влиянием этих факторов на коэффициент трения в зоне контакта индентора с поверхностью материала.

Соотношение зависимостей «нагрузка—глубина внедрения» для разных пар инденторов и твердости образцов

Для пар сферических инденторов (HBD_1/HBD_2) с увеличением разности диаметров $D_1 - D_2$ $K_{ф.ср.}$ увеличивается для всех сталей, но с увеличением твердости рост $K_{ф.ср.}$ замедляется, что, очевидно, вызвано большим снижением коэффициента трения для шарика большего диаметра, а значит, уменьшением усилия, требуемого для внедрения этого шарика на определенную глубину, т.е. рост $F_1(h)/F_2(h)$ будет уменьшаться.

Это подтверждается тем, что в случае стали высокой твердости (кривая 3) значение $K_{ф.ср.}$ для всех пар сферических инденторов оказывается меньше, чем для сталей более низкой твердости, т.е. разница в относительной «тупости» инденторов сглаживается.



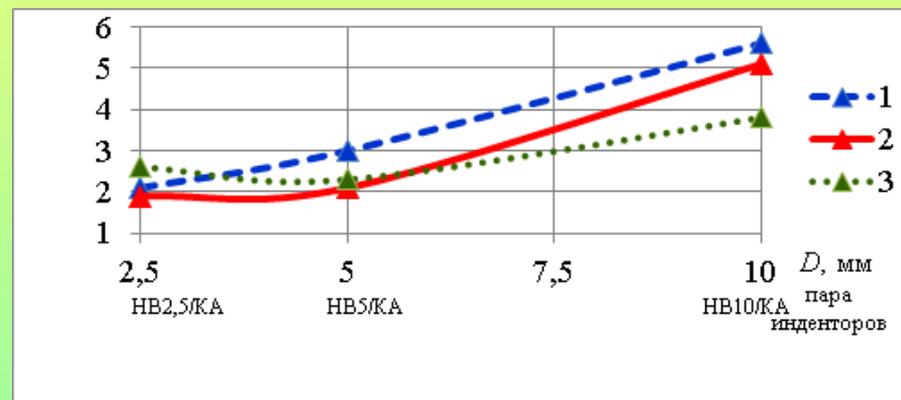
а

Зависимость $K_{ф.ср.}$ разных пар инденторов от их геометрии для сталей низкой (1), средней (2) и высокой (3) твердости: а – HB/HB

Соотношение зависимостей «нагрузка—глубина внедрения» для разных пар инденторов и твердости образцов

Из рис. видно, что для пар инденторов шарик-конус увеличение диаметра шарика приводит к значительному увеличению (в 2,5–2,7 раза) $K_{ф.ср.}$ для стали низкой и средней твердости (кривые 1 и 2) и к гораздо меньшему увеличению (в 1,5 раза) $K_{ф.ср.}$ для стали высокой твердости (кривая 3).

Следует отметить, что, в основном значения $K_{ф.ср.}$ для стали средней и высокой твердости (кривые 2 и 3) ниже, чем для стали низкой твердости (кривая 1). Очевидно, с увеличением твердости сопротивление внедрению алмазного конуса увеличивается в большей степени, чем сопротивление внедрению шариков разного диаметра.



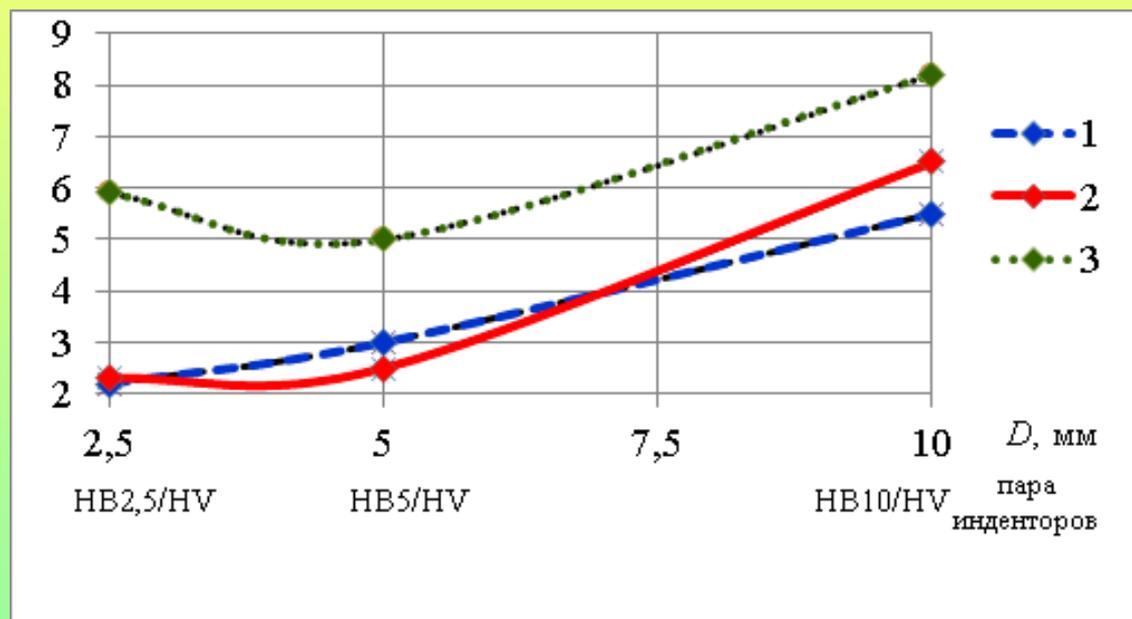
б

Зависимость $K_{ф.ср.}$ разных пар инденторов от их геометрии для сталей низкой (1), средней (2) и высокой (3) твердости: б – НВ/КА

Соотношение зависимостей «нагрузка—глубина внедрения» для разных пар инденторов и твердости образцов

Рис. иллюстрирует влияние диаметра шарика на $K_{ф.ср.}$ пар инденторов НВD/HV для сталей разной твердости. Для образцов №1 и №2 (кривые 1 и 2) увеличение диаметра шарика от 2,5 до 10 мм приводит к увеличению $K_{ф.ср.}$ в 2,5–3,2 раза,

при этом значение $K_{ф.ср.}$ одной и той же пары образцов мало отличается для стали низкой и средней твердости.



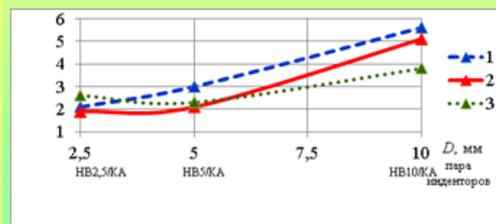
В

Зависимость $K_{ф.ср.}$ разных пар инденторов от их геометрии для сталей низкой (1), средней (2) и высокой (3) твердости: в – НВ/HV

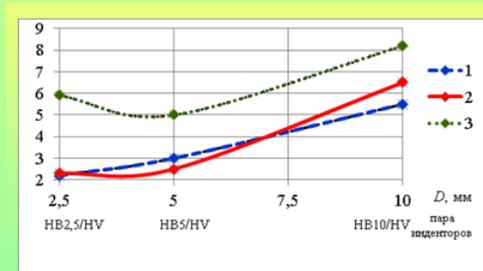
Соотношение зависимостей «нагрузка—глубина внедрения» для разных пар инденторов и твердости образцов

Для стали высокой твердости (кривая 3) при увеличении D от 2,5 до 5 мм происходит уменьшение $K_{ф.ср.}$ с 5,9 до 5,0, а затем при увеличении D до 10 мм $K_{ф.ср.}$ увеличивается до 8,3.

Для всех пар инденторов HBD/HV $K_{ф.ср.}$ гораздо выше для образца №3 в отличие от пар HBD/КА (кривые 1 и 2)



б



в

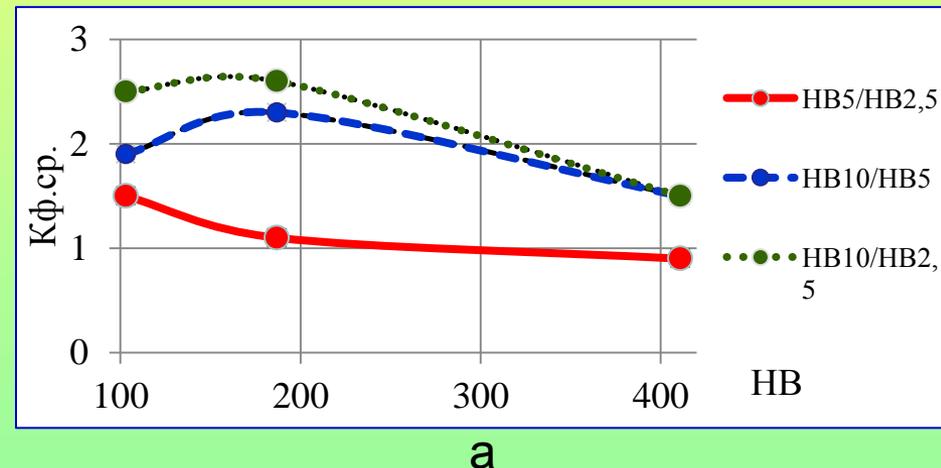
Это говорит о том, что сопротивление проникновению в поверхность образцов пирамиды Виккерса для стали высокой твердости значительно меньше,

чем шариков разного диаметра и алмазного конуса.

Соотношение зависимостей «нагрузка—глубина внедрения» для разных пар инденторов и твердости образцов

Из рис.а видно, что для пары шариков с минимальным различием в диаметре HB5/HB2,5 $K_{ф.сп}$ плавно уменьшается с увеличением твердости. Для пар инденторов HB10/HB5 и HB10/HB2,5 $K_{ф.сп}$ выше, чем для пары HB5/HB2,5, и с повышением твердости с 103 до 187 HB он несколько повышается, а с дальнейшим повышением твердости до 411HB заметно понижается,

причем с повышением твердости разница $K_{ф.сп}$ для этих пар инденторов становится меньше и для твердости 411 HB они практически одинаковы. Такой ход кривых также подтверждает влияние на $K_{ф.сп}$ более интенсивного уменьшения с повышением твердости коэффициента трения для шариков большего диаметра.

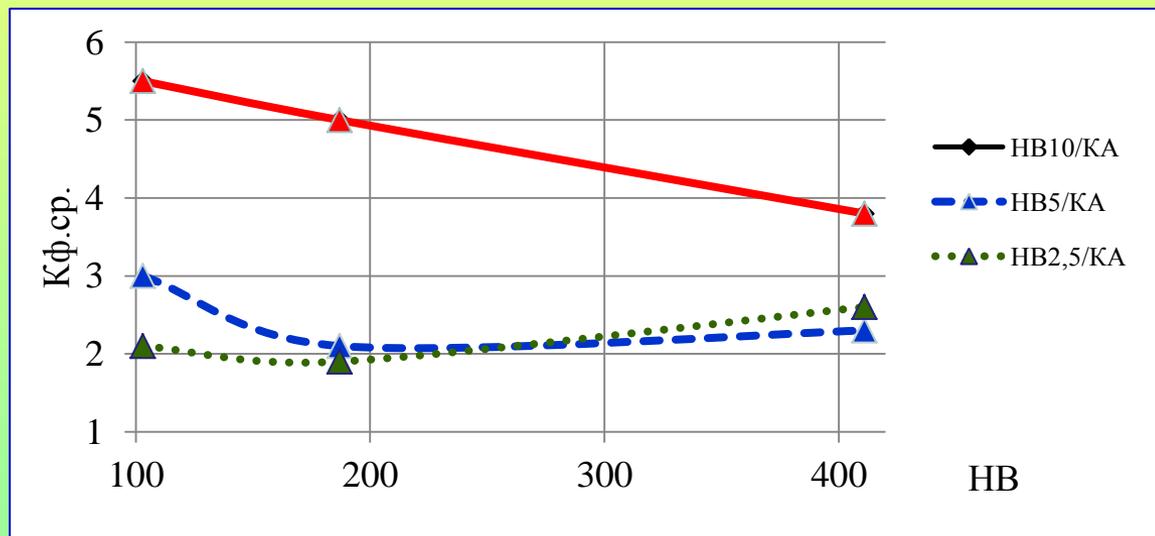


Влияние твердости на $K_{ф.сп}$ пар инденторов разной геометрии:
а — HBD_1/HBD_2

Соотношение зависимостей «нагрузка—глубина внедрения» для разных пар инденторов и твердости образцов

Рис.б показывает влияние твердости на $K_{ф.ср.}$ пар инденторов НВД/КА. Увеличение твердости не оказывает значительного влияния на $K_{ф.ср.}$ пар инденторов НВ2,5/КА и НВ5/КА, тогда как для пары НВ10/КА наблюдается существенное уменьшение $K_{ф.ср.}$ с повышением твердости.

Очевидно, это связано с относительно большим увеличением сопротивления вдавливанию конуса по сравнению с шариком $\varnothing 10$ мм при повышении твердости.

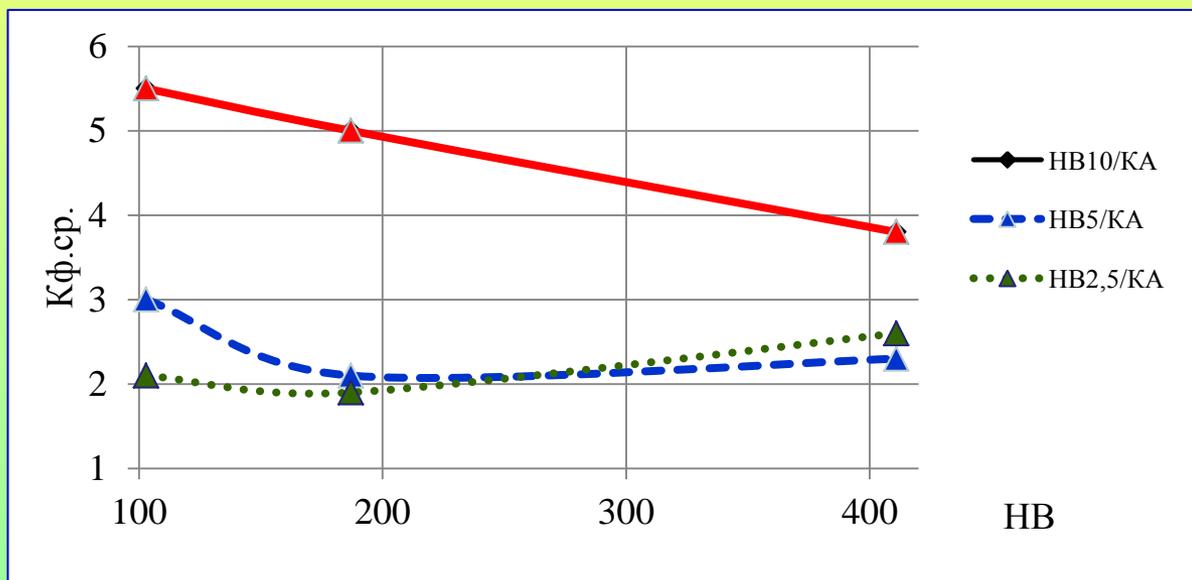


б

Влияние твердости на $K_{ф.ср.}$ пар инденторов разной геометрии: б – НВ/КА

Соотношение зависимостей «нагрузка—глубина внедрения» для разных пар инденторов и твердости образцов

Тот факт, что $K_{ф.ср.}$ для пар инденторов шарик-конус (HBD/KA) с шариками $\varnothing 2,5$ и $\varnothing 5$ мм мало зависит от твердости, а с шариком $\varnothing 10$ мм уменьшается с увеличением твердости, свидетельствует о том, что **относительное уменьшение сил трения при повышении твердости для шариков значительно больше, чем для конуса.**



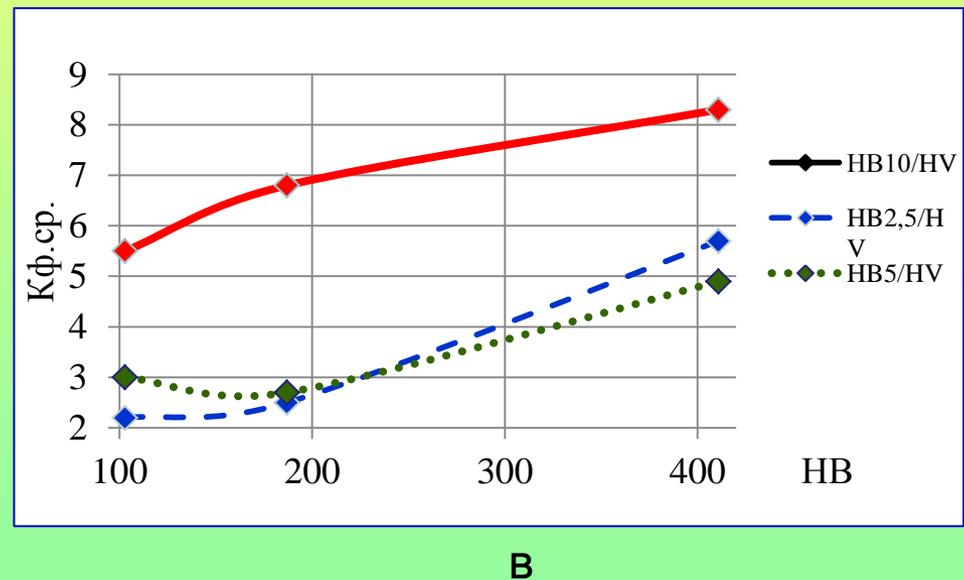
б

Влияние твердости на $K_{ф.ср.}$ пар инденторов разной геометрии: б – HB/KA

Соотношение зависимостей «нагрузка—глубина внедрения» для разных пар инденторов и твердости образцов

Рис.в иллюстрирует влияние твердости на $K_{ф.ср.}$ пар инденторов НВD/HV. С увеличением твердости $K_{ф.ср.}$ для пары инденторов НВ2,5/HV увеличивается в 2,7 раза. Для пары НВ5/HV $K_{ф.ср.}$ сначала немного уменьшается, а затем, с повышением твердости до 411 НВ, увеличивается. $K_{ф.ср.}$ пары инденторов НВ10/HV с повышением твердости с 103 НВ до 411 НВ увеличивается с 5,6 до 8,35, т.е. 1,4 раза.

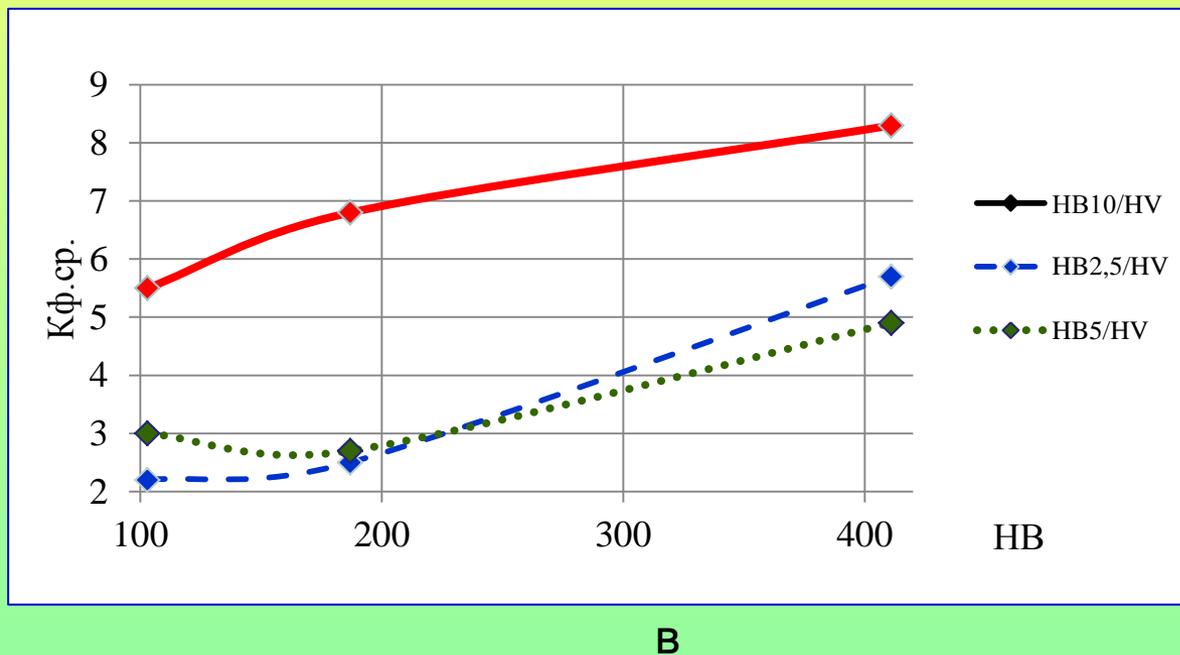
Таким образом, относительно увеличение $K_{ф.ср.}$ с повышением твердости для этой пары существенно меньше, чем для двух других пар. Для всех значений твердости $K_{ф.ср.}$ пары НВ10/HV намного выше.



Влияние твердости на $K_{ф.ср.}$ пар инденторов разной геометрии: в — НВ/НВ

Соотношение зависимостей «нагрузка—глубина внедрения» для разных пар инденторов и твердости образцов

Приведенные данные свидетельствуют о том, что при повышении твердости на $K_{ф.ср.}$ пар НВД/НВ преобладающее влияние оказывает большая «острота» пирамиды по сравнению с шариками по сравнению с более интенсивным уменьшением коэффициента трения для инденторов сферической формы.

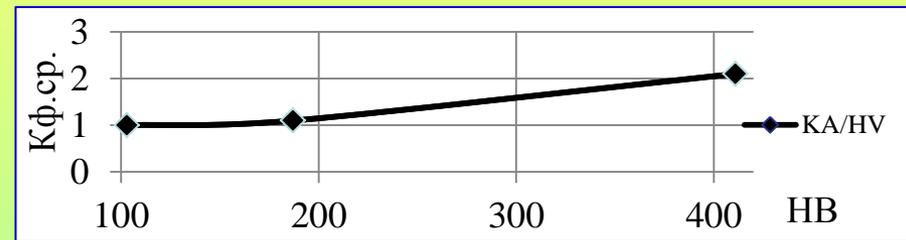


Влияние твердости на $K_{ф.ср.}$ пар инденторов разной геометрии: в — НВ/НВ

Соотношение зависимостей «нагрузка—глубина внедрения» для разных пар инденторов и твердости образцов

На рис.г приведена зависимость $K_{ф.ср.}$ пары инденторов конус-пирамида (КА/HV) от твердости. Для стали низкой и средней твердости $K_{ф.ср.}$ пар инденторов КА/HV составляет 1–1,15.

Возможно, в этом случае большие силы трения при внедрении конуса компенсируются его меньшим углом заострения. Увеличение $K_{ф.ср.}$ при высокой твердости, вероятно, связано со значительно меньшим снижением коэффициента трения конуса по сравнению с пирамидой. Возможно, определенную роль при этом играет более «тупая» вершина конуса (радиус закругления 0,2 мм) по сравнению с пирамидой.



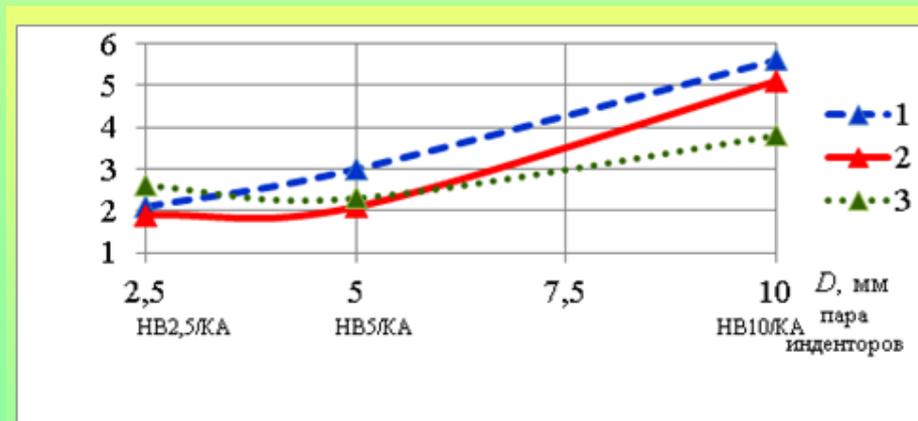
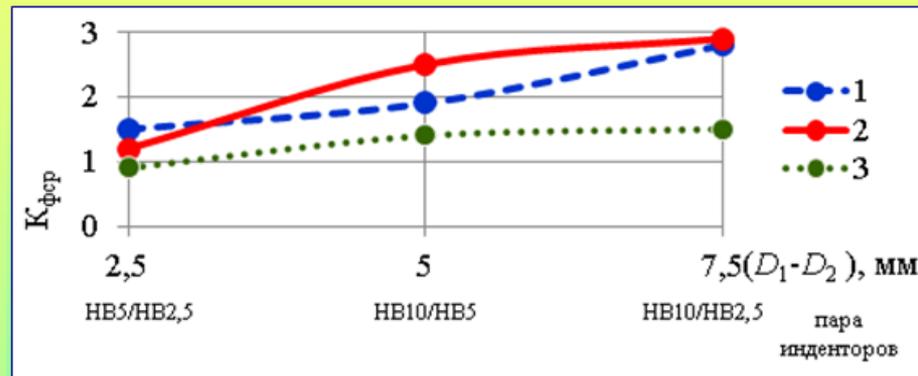
г

Влияние твердости на $K_{ф.ср.}$ пар инденторов разной геометрии:
г – КА/HV

Соотношение зависимостей «нагрузка—глубина внедрения» для разных пар инденторов и твердости образцов

Разный характер зависимости $K_{\text{ф}}$ от глубины внедрения индентора h для разных пар инденторов и стали разной твердости объясняется неодинаковым снижением коэффициента трения с увеличением степени деформации для инденторов разной геометрии.

В частности уменьшение $K_{\text{ф.ср.}}$ с увеличением h при повышенной твердости для инденторов (HBD/HV) объясняется более интенсивным уменьшением коэффициента трения шариков по сравнению с пирамидой.



Список литературы к лекции 31

- 1) Мощенок В.И. Новые методы определения твердости материалов : монография / В.И. Мощенок. – 2-е изд. доп. и перераб. – Х. : ХНАДУ, 2013. – 324 с.
- 2) Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора / С. И. Булычев, В. П. Алехин. - М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
- 3) W. Wolf. Infernu of mechanical properties from instrumented depth sensing indentation depths . / W. Wolf.// Crust. Res. Technol. – 2000. – 35. – P. 377-399.



Контрольные вопросы

1) Какова роль трения при вдавливании инденторов разной формы?

2) Как можно расположить инденторы в порядке возрастания сил трения?

3) Чем объясняется разный характер зависимости K_{ϕ} от глубины внедрения индентора h для разных пар инденторов и стали разной твердости ?



Задания для самостоятельной работы

1. Изучить по литературным источникам значения коэффициентов трения для разных пар материалов, факторы, которые влияют на коэффициент трения скольжения.





Кафедра технології металлов и матеріалознавства

Лалазарова Наталиа Алексеевна

E-mail: lalaz1991@mail.ru

г. Харькoв, ул. Петровского, 25, ХНАДУ, КАФЕДРА ТМ и М

Tel.(8-057)707-37-92

