

σ_r , Па

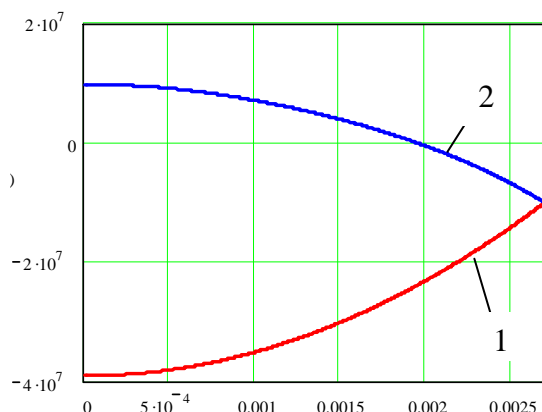


Рис. 5. Типичная зависимость радиальных напряжений от температуры (1) и радиации (2)

Ввиду отсутствия аналитических решений данной задачи, сравнение проводилось с результатами решения термоупругой задачи при отсутствии радиационного воздействия [2]. Согласно [2], перемещения и напряжения при температурном нагружении определяются по формулам:

$$u_r = \frac{1+\nu}{1-\nu} \cdot \alpha \cdot \frac{1}{r} \int_0^r T(r) r dr + C_1 r + \frac{C_2}{r},$$

$$\sigma_r = \frac{\alpha E}{1-\nu} \cdot \frac{1}{r^2} \int_0^r T(r) r dr + \frac{E}{1+\nu} \cdot \left(\frac{C_1}{1-2\nu} - \frac{C_2}{r^2} \right), \quad (18)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha E}{1-\nu} \cdot \frac{1}{r^2} \int_0^r T(r) r dr + \frac{\alpha E \cdot T(r)}{1-\nu} + \frac{E}{1+\nu} \cdot \left(\frac{C_1}{1-2\nu} + \frac{C_2}{r^2} \right).$$

HVISEVICH V.M., VEREMEJCHIK A.I. Research intense the deformed condition of the continuous cylinder at temperature, mechanical and radiation loading

The solution of a task on determination of tension and deformations of the uniform infinitely long cylinder which is exposed to influence of radiation, temperature loading and external pressure is considered. The system of the differential equations of balance in movements is received and analytically solved. For the fixed value of time values a component of tension and deformations depending on coordinate are found. Their dependence on time of radiation and properties of a material is investigated.

УДК 539.216.2

Сазонов М.И., Хвисевич В.М., Веремейчик А.И., Гарбачевский В.В.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Введение. С созданием электронной, лазерной, плазменной технологий начали развиваться методы, основанные на использовании локальных высокотемпературных источников нагрева [1–3], в результате были разработаны технологические процессы упрочнения изделий, которые в настоящее время получили широкое применение. Требуемое качество деталей достигается путем изменения физико-механических свойств поверхностного слоя при воздействии на материал высокотемпературного источника тепла. В данном случае уменьшается применение дорогостоящих материалов, на порядок увеличивается износостойкость и долговечность изнашиваемых деталей. Особенностью таких процессов является отсутствие коробления деталей. Воздействие потока энергии на упрочняемые участки можно осуществлять как перемещением локального источника тепла, так и самой обрабатываемой детали, а это дает возможность автоматизировать технологические процессы и управлять ими.

Перемещение u_r должно обращаться в нуль при $r = 0$, поэтому в (18) отбросим член, содержащий C_2 . При $r = R$: $\sigma_r = 0$, поэтому $C_1 = \frac{\alpha \cdot (1+\nu) \cdot (1-2\nu)}{1-\nu} \cdot \frac{1}{R^2} \int_0^R T(r) r dr$. В этом случае

$$u_r = \frac{1+\nu}{1-\nu} \cdot \alpha \cdot \left[(1-2\nu) \cdot \frac{r}{R^2} \int_0^R T(r) r dr + \frac{1}{r} \int_0^r T(r) r dr \right].$$

В данной задаче, при $T(r) = 1006,929 - 4,6546 \cdot 10^6 r^2$, получим: $u_r = 0,020843r - 34,574r^3$. Учитывая $S=0$ в (7), получим следующее решение: $u_r = 0,02084292r - 34,57381r^3$. Это подтверждает правильность проведенных расчетов.

Заключение. Реализована осесимметричная краевая задача теории упругости для однородного длинного цилиндра, который подвергнут радиационному, температурному и механическому воздействиям.

Полученное НДС твэла позволяет оптимизировать его геометрические и физические параметры.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

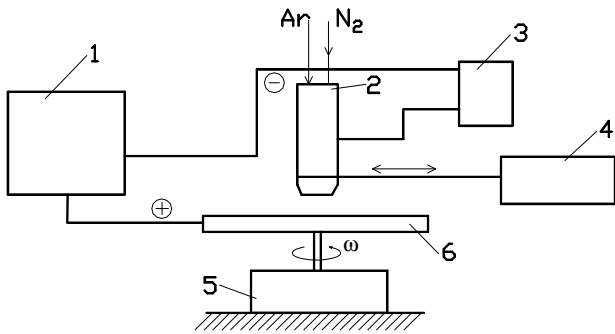
- Куликов, И.С. Прочность тепловыделяющих элементов быстрых газоохлаждаемых реакторов / И.С. Куликов, Б.Е. Тверковкин. – Мн., 1984.
- Тимошенко, С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер – М., 1979.

Материал поступил в редакцию 23.11.12

Сазонов Михаил Иванович, д.т.н., профессор кафедры сопротивления материалов и теоретической механики Брестского государственного технического университета.

Гарбачевский Виталий Владимирович, магистрант кафедры сопротивления материалов и теоретической механики Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.



1 – силовой источник электропитания; 2 – плазматрон; 3 – высокочастотный генератор; 4, 5 – манипуляторы; 6 – упрочняемая деталь
Рис. 1. Принципиальная схема установки для ППЗ

Поджиг дуги производится при помощи высоковольтного ВЧ-генератора, который подключен одним полюсом к катоду плазматрона, другим к его соплу. Перед запуском плазматрона устанавливаются заданные расходы рабочего газа аргона и защитного газа азота. Кроме того, задается определенная скорость перемещения плазматрона на основе предварительно проведенных экспериментов по упрочнению на образцах. Затем на плазматрон подается напряжение от силового источника и включается ВЧ-генератор, который обеспечивает пробой газового зазора между катодом и соплом; в этот момент сопло служит поджигающим электродом. По образовавшемуся искровому каналу развивается дежурная дуга между катодом и соплом, ток дуги ограничивается переменным сопротивлением, которое включено в электрическую цепь между соплом и анодом, устанавливается в пределах 4-6 А и регулируется изменением величины R. Под действием потока аргона через плазматрон слаботочная дуга выдувается из плазматрона и замыкается на анод-деталь. Приложенное напряжение к плазматрону от силового источника обеспечивает загорание основной дуги между катодом и анодом, а дежурная дуга автоматически отключается.

Проведены исследования вольт-амперных характеристик дуги при токах 7–30 А, при этом напряжение дуги составляет 14–36 В в зависимости от соотношения расходов аргона и азота. Аргон и азот в плазматрон подаются из баллонов высокого давления через редукторы и вентили. Измерение расходов аргона осуществляется при помощи расходомера типа РМ – 0.63 ГУЗ, а азота РМ – 0.063 ГУЗ. Измерения расхода воды производилось при помощи мерного сосуда и секундомера, а температура холодной и нагретой в плазматроне воды – ртутным термометром.

Для перемещения плазматрона относительно закаливаемой детали использован манипулятор с двигателем с магнитным роликом, который приводит в движение ротором, в свою очередь ролик катится по торцу модели закаливаемой детали. Кроме того, разработан и изготовлен специальный манипулятор, который непосредственно вращает упрочняемую деталь с заданной скоростью, причем угловая скорость детали может изменяться в пределах 0,5–180 об./мин при помощи разработанной электронной системы управления двигателем. Таким образом, на созданной установке могут проводиться исследования с целью разработки основ поверхностной закалки образцов и деталей.

2. Некоторые результаты и их обсуждение. Исследования проводились на ножах из стали 45. На рисунке 2 представлен закаленный образец.



Рис. 2. Закаленный нож

Проведено исследование температурных полей при закалке режущей кромки. По режущей кромке прикладывалась температура 1300 °С, остальные поверхности находились при температуре 20 °С. Рассматривалась задача теплопроводности в стационарной и нестационарной постановке. Основные физико-механические характеристики материала принимались по [4]. Для расчетов использовался конечно-элементный комплекс «ANSYS». На рисунке 3 приведена схема ножа, на рисунке 4 – его конечно-элементная модель.

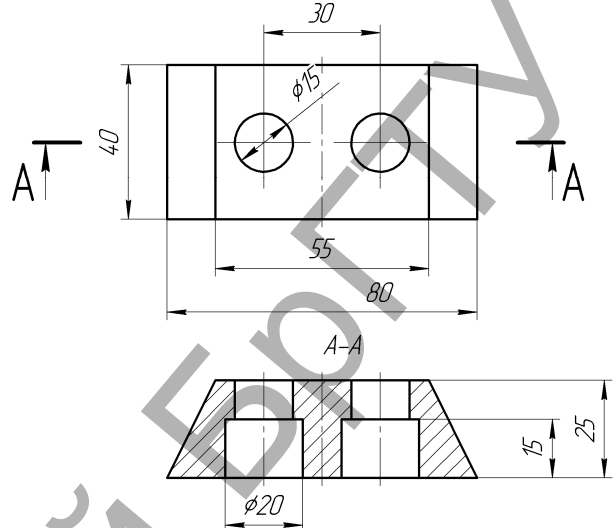


Рис. 3. Схема ножа

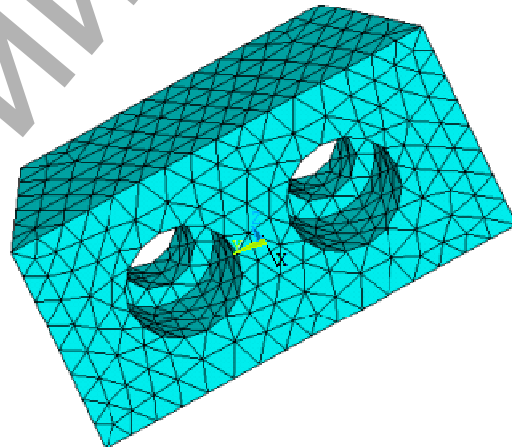


Рис. 4. Конечно-элементная модель ножа

В результате вычислений получено распределение температурных полей по режущей кромке ножа (рис. 5) и по его опорной поверхности (рис. 6).

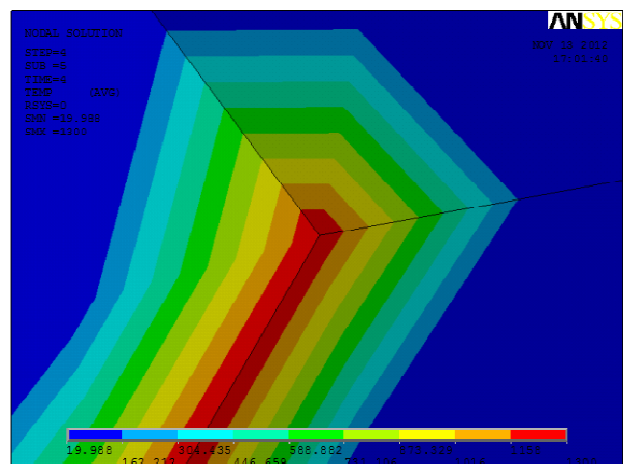


Рис. 5. Распределение температурных полей по режущей кромке

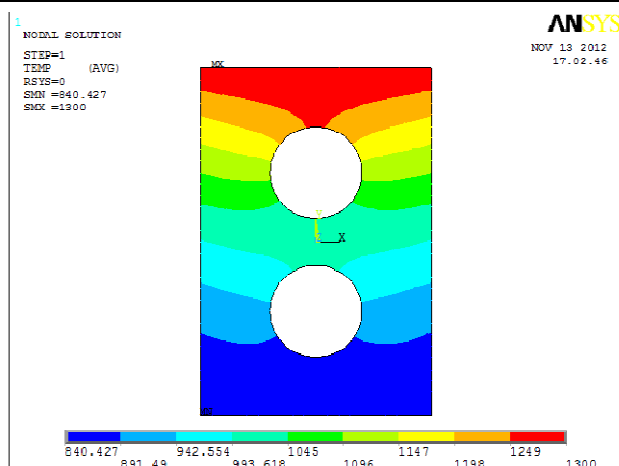


Рис. 6. Распределение полей температур на опорной поверхности ножа

Результаты теплового анализа сохраняются в файле с расширением .rth и могут быть использованы при проведении статического анализа ножа в качестве внешней нагрузки. При решении задачи термоупругости в случае одновременного действия механической нагрузки и полей температур полученные тепловые поля будут использоваться в качестве температурных добавок напряжений и учитываться в уравнениях термоупругости.

Исследованы микротвердость поверхностного слоя в зависимости от расхода аргона, тока дуги, скорости перемещения плазматрона. Определены зависимости микротвердости стали от скорости движения плазменной дуги по глубине поверхностного слоя. Типичная зависимость микротвердости по глубине представлена на рис. 7.

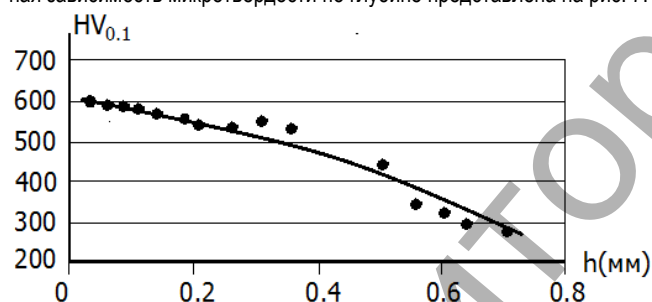


Рис. 7. Характер распределения микротвердости упрочненного слоя по глубине при $v = 11$ мм/с

Как видно из построенной кривой, значение микротвердости почти в 2 раза выше исходного. Анализ различных скоростей движения плазматрона показывает, что наибольшая глубина упрочненного слоя достигается при $v = 11$ мм/с, т.е. уменьшение скорости движения плазменной дуги приводит к увеличению глубины упрочненного слоя.

В результате реализации такого процесса достигнуто увеличение микротвердости до 500-600 $HV_{0.1}$, причем толщина упрочненного слоя может изменяться в зависимости от скорости упрочнения от 0,4 до 0,7 мм. Кроме того, изучено влияние величины тока дуги на микротвердость и глубину закаленного слоя. Как показали исследования, значительное влияние на формирование структуры материала поверхностного слоя и микроструктуру оказывает также среда, в которой горит дуга. В стали, обработанной плазменной струей в защитной среде аргона (однократная обработка) не наблюдается значительных качественных изменений в структуре материала при различных параметрах процесса. При термообработке стали плазменной струей в защитной среде азота четко наблюдаются все три характерных слоя, которые видоизменяются при различных расходах защитного газа. Во внутренней зоне, плавно переходящей в исходный металл, наблюдается преимущественная ориентировка

зерен (текстура), которая возникает вследствие пластической деформации и аналогичной структуре ядра материала. Граница этой зоны соответствует глубине теплового влияния плазменной струи. Вторая зона состоит из равноосных зерен рекристаллизованного материала. Этот слой был подвержен расплавлению и при такой температуре произошел процесс перекристаллизации.

Поверхностный слой обработанной стали содержит дендритную структуру, возникающую в процессе перекристаллизации материала. Дендритная структура материала хорошо наблюдается при увеличении $\times 675$, она возникла вследствие быстрого охлаждения нагретого материала. Обследование закаленных образцов показало, что увеличение тока дуги ведет к значительному расширению зоны теплового воздействия плазменной струи.

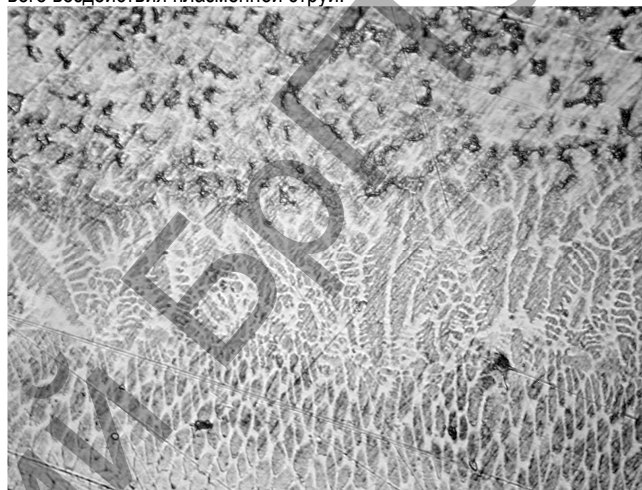


Рис. 8. Микроструктура стали при токах дуги при $I = 15$ А ($\times 675$)

Проведены исследования фазового состава упрочненного слоя стали методом дифракции рентгеновских лучей. Сравнение фазового состава поверхностного слоя образцов, обработанных плазменной струей в защитных средах азота и аргона, показали значительное отличие.

Заключение. Разработана установка для поверхностного плазменного упрочнения режущего инструмента. Изучены зависимости микротвердости при изменении тока, скорости перемещения плазматрона. Установлено, что данный способ позволяет повысить твердость поверхностного слоя до 600 HV. Преимуществом данного способа является упрочнение лишь поверхностного слоя, сердцевины при этом остается пластичной.

На примере поверхностного упрочнения ножа для дробления древесных отходов показано, что такая технология позволяет закалывать лишь отдельные области деталей, которые подвергаются износу. В результате предоставляется возможность автоматизировать процесс и повысить его производительность.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Спиридонов, Н.В. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин / Н.В. Спиридонов [и др.] – Мн.: Вышэйшая школа, 1988. – 158 с.
2. Рыкалин, Н.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: справочник / Н.Н. Рыкалин [и др.] – М.: Машиностроение, 1985. – 485 с.
3. Кундас, С.П. Компьютерное моделирование процессов термической обработки сталей: монография – Мн.: Бестпринт, 2005. – 313 с.
4. Таблицы физических величин: справочник / Под ред. И.К. Кикоина – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.

Материал поступил в редакцию 29.11.12

SAZONOV M.I., HVISEVICH V.M., VEREMEJCHIK A.I., GARBACHEVSKIY V.V. Installation for plasma superficial hardening of the cutting tool

On the basis of theoretical and pilot studies of properties of an electric arch the plasmatron and plasma installation for superficial hardening of details is modernized.

Superficial training of cutting edges of knives for crushing of wood waste is executed. For optimization of process and an assessment of strength characteristics of details chislenno by means of the program ANSYS complex problems of heat conductivity and thermoelasticity are realized at influence of a local moving source of heat.

УДК 521.763

Барсуков В.Г., Хвисевич В.М., Чикова Т.С., Барсуков В.В.

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СТЕСНЕННОГО УПРУГО- ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛА ПРИ ИНДЕНТИРОВАНИИ

Введение. Индентирование является весьма распространенным методом исследования деформационных свойств материалов, реализуемым на широком спектре устройств [1, 2]. В литературе предложены варианты определения показателей ряда деформационно-прочностных характеристик материала (модуль упругости, твердость, предел текучести, коэффициенты в функциональной зависимости сопротивления деформации) путем обработки диаграмм вдавливания [2–6]. Поскольку в процессе внедрения индентора возникает сложное напряженно-деформированное состояние, то при математической обработке экспериментальных данных используют те или иные упрощения, например, допущение о постоянстве нормальных напряжений на поверхности контакта [7, 8] или средних деформаций в отпечатке [9]. В ряде работ использованы методы, основанные на численном интегрировании дифференциальных уравнений механики деформируемого твердого тела [10–13]. В частности, в работе [13] выполнено конечно-элементное моделирование внедрения в упруго-пластический материал конического индентора с углом при вершине $140,6^\circ$, эквивалентного индентору Берковича. Установлено существование зоны затрудненной деформации вблизи вершины индентора, причем размеры области влияния (25–40 нм) сопоставимы с размером наноиндентора (радиус скругления 50–100 нм).

Вместе с тем, разработанные методы хорошо описывают начальную (упругую) или заключительную (пластическую) стадии процессов индентирования. Переходная стадия, соответствующая стесненному упруго-пластическому деформированию, изучена недостаточно [14, 15].

Краткий анализ методов индентирования. При статическом определении твердости в поверхность испытываемого материала с определенной силой вдавливаются индентор–тело, выполненное в виде шарика, алмазного конуса, пирамиды или иглы [16, 17]. В зависимости от способа измерения различают твердость по Бринеллю, Роквеллу, Мейеру, Мартелю, Кнупу, Шору, Виккерсу, Моосу и др.

Измерение твердости по Бринеллю основано на внедрении в плоскую поверхность испытываемого образца стального закаленного шарика определенного диаметра D (10; 5 или 2,5 мм) под постоянной нагрузкой P и измерении диаметра отпечатка d , остающегося после снятия нагрузки. Твердость, выраженную в кгс/мм², определяют по формуле

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (1)$$

Метод применяют для измерения твердости поверхности не более 450 HB [16]. При выборе шарика используют правило: диаметр отпечатка должен лежать в пределах 0,2...0,7 диаметра шарика.

Измерение твердости по Мейеру по схеме аналогично методу Бринелля. Вычисление НМ производится как отношение нагрузки к площади проекции отпечатка шарика на плоскость, перпендикулярную направлению действия нагрузки [17], т.е.

$$HM = \frac{4P}{\pi d^2}. \quad (2)$$

По размерам отпечатка, остающегося после снятия нагрузки, определяют твердость по Виккерсу и микротвердость. В качестве индентора (вдавливаемого наконечника) в этих методах используют четырехгранную пирамидку с углом при вершине 136° (2,38 рад). Твердость по Виккерсу HV определяется по формуле [17]

$$HV = 0,189P/d_0^2,$$

где P – нагрузка, Н; d_0 – размер диагонали отпечатка, остающегося после снятия нагрузки, мм. Испытания проводят при нагрузках от 9,8 до 980 Н, в зависимости от толщины детали [16]. Метод Виккерса используется для определения твердости малотолщинных деталей и изделий с покрытиями.

Микротвердость по Кнупу определяют путем вдавливания алмазной пирамиды с углами между противоположными гранями 2,27 и 3,01 рад [17].

Для измерения твердости термо- и химико-термически обработанных сталей, твердых сплавов, керамики, покрытий, цветных металлов и сплавов широко используют метод Роквелла, согласно которому в твердое тело внедряют алмазный конус с углом при вершине 120° (для шкал А и С) или стальной закаленный шарик диаметром 1,588 мм (для шкалы В) [16]. Определение твердости по Шору основано на измерении глубины проникновения в материал усеченного конуса под действием пружины.

Применяются также методы определения твердости по отскоку легкого бойка, падающего с определенной высоты на испытываемую поверхность. В частности, по Мартелю шарик падает на гладкую поверхность металла с некоторой высоты и оставляет на ней сферический отпечаток [18]. Показатель твердости HMR определяется как отношение работы деформации к объему вытесненного из отпечатка материала. Это отношение имеет размерность давления и рассматривается как динамическая твердость материала. Уточнение метода с учетом упругого восстановления отпечатка приведено в работе Тейбора [19]. Твердость по Мартелю (HMR) имеет ту же размерность, что и HM , описывает один и тот же процесс, поэтому в работе [18] предложено считать $HMR = K \cdot HM$, где $K = 1,14–1,30$ – безразмерный параметр, величина которого определяется расчетом или экспериментально.

Сравнительный анализ твердости минералов производят по Моосу путем царапания более твердым минералом менее твердого. В качестве эталонов шкалы приняты в порядке убывания твердости следующие минералы: алмаз-10, корунд-9, топаз-8, кварц-7, ортоклаз-6, апатит-5, флюорит-4, кальцит-3, гипс-2, тальк-1.

В нанотвердомерах при индентировании и царапании в основном применяют трехгранные пирамидальные инденторы Берковича, поскольку технология их изготовления путем скалывания алмаза по кристаллографическим плоскостям обеспечивает наиболее совер-

Барсуков Владимир Георгиевич, д.т.н., проректор УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купаль».

Чикова Тамара Семеновна, д.ф.-м.н., профессор кафедры технической механики УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купаль».

Беларусь, ГрГУ, 230023, г. Гродно, ул. Э. Ожешки, 22.

Барсуков Виктор Владимирович – инженер Гродненского дома науки и техники.