

Волков И. В.

Дегтярева Ю. Ю.

**Восточноукраинский
национальный
университет имени
Владимира Даля**

УДК 621.9.048

ОБ УПРОЧНЕНИИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ НА ВИБРАЦИОННЫХ СТАНКАХ

Розглянуто питання, пов'язані з розвитком віброударної обробки. Проаналізовано параметри, які використовували різні автори для оцінки якісних показників процесу ВіУО, й результати, ними представлені. Показано суперечливість інформації у різних авторів і у зв'язку з цим необхідність розробки загальної методики проведення експериментальних досліджень процесу ВіУО.

Questions, related to development of vibroshock treatment, are considered. Parameters for the estimation of high-quality indexes of process of oscillation consolidating treatment and results that used by different authors, are analyzed. The difference of information that was given by those authors is shown. Necessity of development of general method of experimental researches for process of oscillation consolidating treatment is shown.

«... Вибрационная упрочняюще-поверхностная обработка ... повышает предел усталостной прочности деталей в 1,5 – 2 раза...».

Шаинский М. Е.

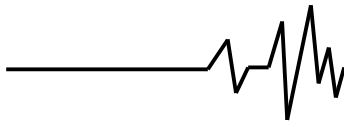
Современная рыночная экономика требует постоянного изготовления новых изделий с повышенным качеством, высокими эксплуатационными свойствами при стремлении к низкой себестоимости. Эксплуатационные свойства во многом зависят от состояния поверхностного слоя: физико-механических свойств и микрогеометрии. Данное положение, ставя задачу повышения качества поверхностей, тем самым повышает требования к финишным операциям.

На протяжении периода развития НИЛ «ОСА» под руководством М.Е. Шаинского проводились работы, в основном, по изучению отделочно-зачистных операций (виброшлифование и виброполирование). Однако вибрационная обработка, как метод, обладает более широкими возможностями. К группе операций, менее изучаемых в тот период, относятся, например, нанесение покрытий, стабилизация остаточных напряжений, упрочнение и пр.

Остановимся на одной из них, а именно – упрочнении. Основой вибрационного упрочнения является динамический характер протекания процесса, сопровождаемый множеством ударов с малой энергией частиц рабочей среды по поверхности обрабатываемых деталей и обеспечивающих пластическое деформирование поверхностного слоя, в результате повышается микротвердость, образуются сжимающие остаточные напряжения первого рода и снижаются высотные параметры шероховатости поверхности, сглаживаются формы профиля микронеровностей и увеличивается его опорная поверхность.

Виброупрочнение является универсальным методом упрочняющей обработки. В первую очередь преимущества данного метода проявляются при обработке деталей сложной формы и при одновременной обработке большой партии деталей [1].

Ниже проведен анализ работ, посвященных влиянию виброупрочняющей



обработки на эксплуатационные свойства деталей.

Заслуживают внимания исследования в области виброупрочнения, проведенные В.П. Устиновым. Автором рассматривалось изменение напряженного состояния поверхностного слоя стали ШХ15. Образцы имели следующие характеристики: закаленная сталь (HRC 62) и отожженная (HB185), длина – 150 мм, диаметр – 8 мм. Обработка проводилась на вибрационной установке УВГ 4×10 (конструкция НИИТМа г. Ростов-на-Дону) с контейнером объемом 10 л с режимами: частота 33 Гц и амплитуда 1,5-2,0 мм, с промывкой 3%-ным содовым раствором. В качестве единичных элементов рабочей среды автор использует шары диаметром 9 и 16 мм, ролики диаметром 15 и 20 мм с длинами соответственно 15 и 20 мм и абразивные гранулы размерами 20-35 мм (можно предположить, что последние – бой шарошлифовальных кругов, как наиболее распространенный сегодня материал на операциях виброшлифования). Причем автор проводил исследования для образцов различной массы (утяжелял вышеописанные образцы). Результаты данных экспериментальных исследований представлены в виде графиков на рис. 1 и табл. 1.

При анализе приведенных данных возникает несколько вопросов, а именно – связанных с амплитудно-частотными характеристиками (обработка проводилась на частоте 33 Гц; амплитуде 1,5 мм; объеме контейнера 10л; при принятой высоте загрузки 75%). В связи с этим возникает вопрос: было ли циркуляционное движение массы загрузки или только осциллирующее? Если не было циркуляции, то где располагались образцы? Если число шаров или роликов в столбце не могло составлять более 10-20 штук при диаметрах от 9 до 20мм соответственно, то сколько гранул (по столбцу в высоту) принимало участие в ударе?

Трудно согласиться с результатами, представленными на графиках (рис. 1, в и г). Чем можно обосновать, что обработка в абразивных гранулах имеет максимальные значения напряжений сжатия по сравнению с остальными и затем резко падает, т.е. форма кривой отлична от всех прочих?

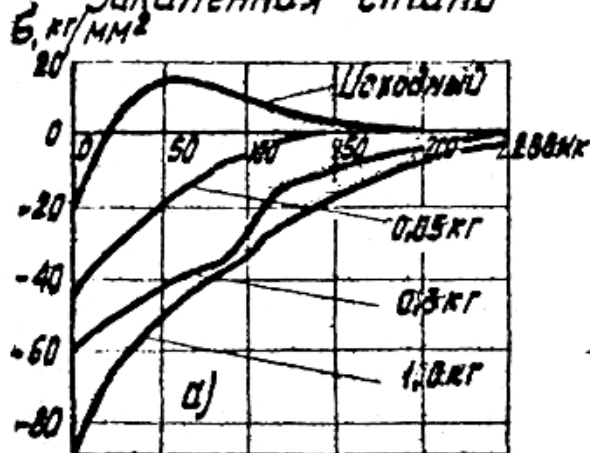
Далее в статье [2] автор «...делает попытку рассмотреть некоторые стороны взаимодействия частиц рабочей среды с обрабатываемой деталью в процессе вибрационной отделочно-упрочняющей обработки с точки зрения теории удара».

Определено, что при вибрационной обработке отожженной стали 40X в стальных закаленных шарах диаметром 9 мм с частотой колебаний 25 Гц и амплитудой 2 мм, скорость гранулы 0,1-0,2 м/с, а усилие динамического вдавливания гранулы рабочей среды в обрабатываемую поверхность колеблется от 2,15 до 4,3 кг.

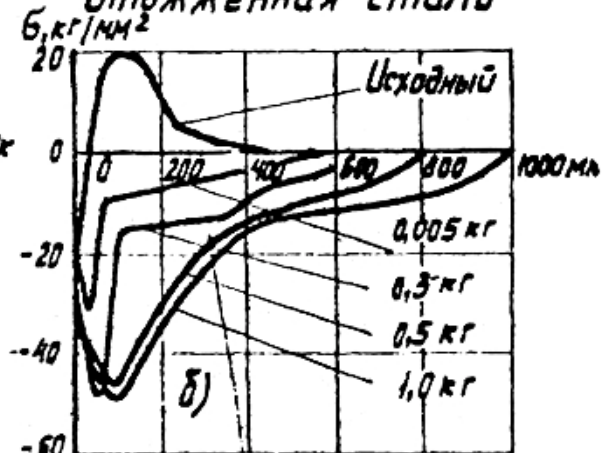
В этом же сборнике представлена статья Ходоша Б.Б. [3], которая стоит особняком среди работ, посвященных виброупрочнению поверхности деталей. В этой статье рассматривается «...влияние отдельных факторов процесса вибрационной обработки на упрочнение переходных поверхностей». В большинстве работ по вибрационной обработке (например, [4, 5]) исследователи говорят о преимуществе этого метода при обработке деталей сложной формы, при этом все указывают, что выступающие части и расположенные на них острые кромки обрабатываются быстрее. Это достоинство обеспечивается отсутствием жесткой кинематической связи между станком – инструментом – обрабатываемой деталью, но и это же лишает вибрационную обработку избирательности. Автором [3] исследовались образцы, имеющие галтели, фаски, выточки и острые кромки. Вибрационная обработка осуществлялась в контейнере емкостью 10 л на частоте 33 Гц и амплитуде 2 мм, но в рабочей среде, состоящей из смеси шаров диаметром 1,5-9 мм и смеси роликов диаметрами 15, 20 мм и соответственно длинами 15, 20 мм. Обрабатывались образцы из стали 45X твердостью HB 230-255. Результаты по изменению микротвердости поверхностного слоя образца из стали 40X (а по тексту речь идет о стали 45X, следует предположить, что в подрисуночной надписи описка) в среде из смеси стальных закаленных роликов за 15 мин. представлены на рис. 2.

По полученным результатам также возникает несколько вопросов. Каких размеров и масс были или был образец? Не сталкивались ли они (если их было несколько) друг с другом? И если за такое время (15 мин) произошел наклеп, да еще и в самом скрытом сечении I-I (рис. 2) до 300 кг/мм² на глубину до 60 мкм, то каковы тогда силы взаимодействия гранулы – образец? Однако предложение автора о необходимости разработки рекомендаций по упрочнению деталей, имеющих конструктивные концентраторы напряжений, имеет право на существование, и решение подобной задачи очень важно, хотя следует еще раз заметить, что работы, посвященные этой теме, малочисленны.

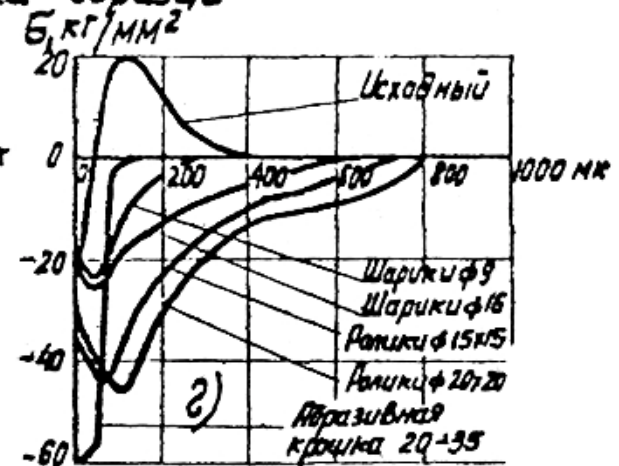
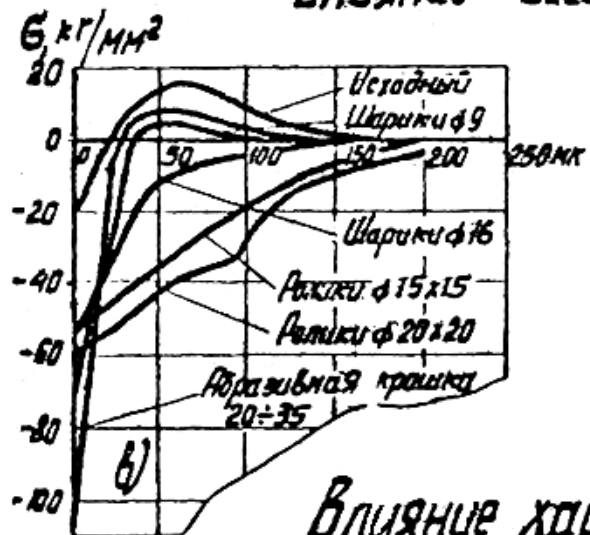
Закаленная сталь



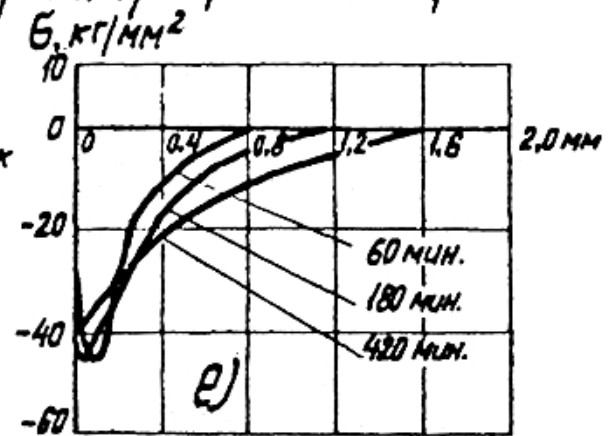
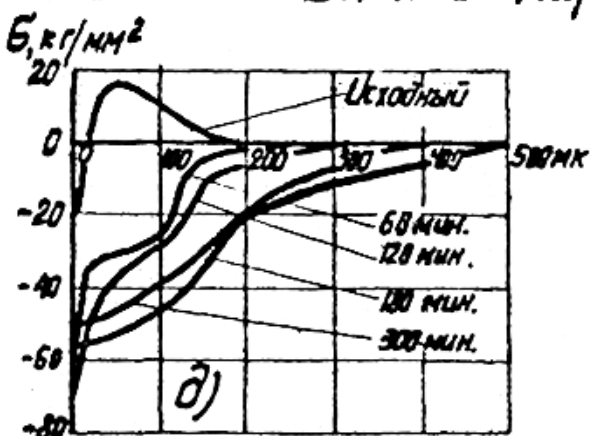
Отожженная сталь



Влияние веса образца



Влияние характера рабочей среды



Влияние продолжительности обработки

Рис.1. Распределение осевых остаточных напряжений первого рода в поверхностном слое стали ШХ15 после вибрационной обработки по Устинову В. П. [1]

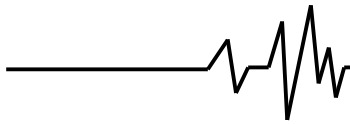


Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований [1]

Материал	Режимы обработки		Масса образцов, г	Величина напряжения сжатия σ , кг/мм ²	Глубина распространения, мкм
	Частота f , Гц	Амплитуда A , мм			
ШХ15 закаленная	33	1,5	50-1000	80	100-150 250-300
ШХ15 отожженная	33	1,5	50-1000	20-30 30-46	50 80-110

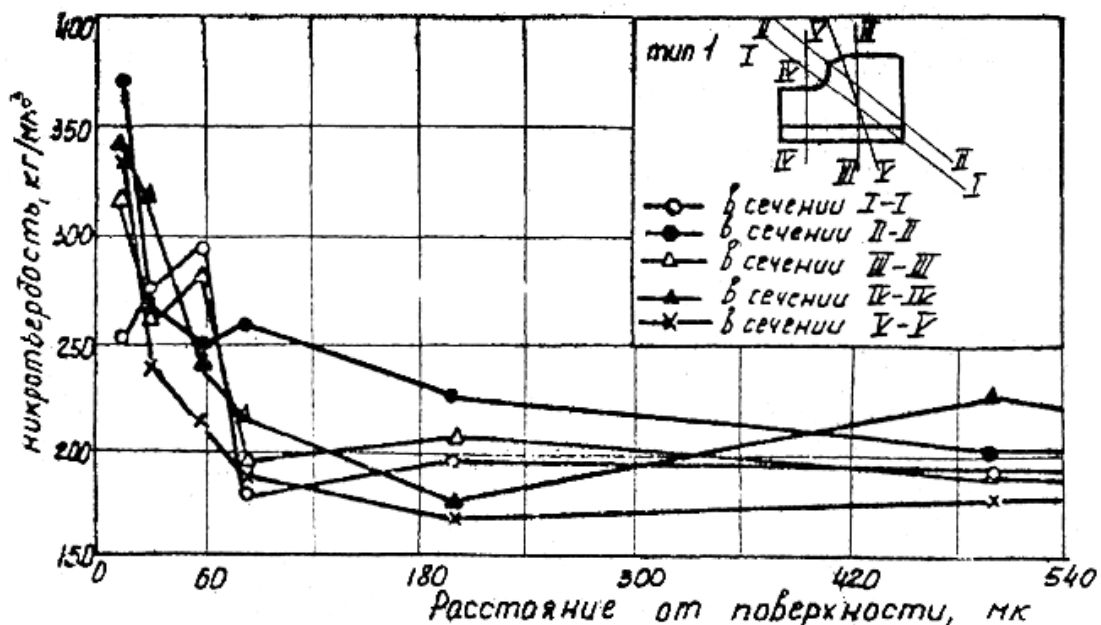
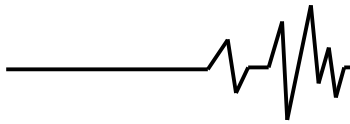


Рис. 2. Изменение микротвердости поверхностных слоев металла образца из стали 40X при виброгалтовке в среде – смесь стальных закаленных роликов за 15 минут [3]

К группе экспериментаторов, занимающихся виброупрочнением, следует добавить и работы Юркевича В.Б. Например, в 1972 году была опубликована статья «Исследование скоростей, ускорений и сил соударений частиц среды с деталью при виброупрочнении» [6]. К этому моменту виброобработчики уже уверенно утверждали, что «...накопленный обширный экспериментальный материал и теоретические исследования позволили выявить технологические возможности процесса виброупрочняющей обработки». Автор считал, что «пути ... интенсификации процесса с получением максимально выгодных параметров ... исследованы недостаточно». В результате проведенных им исследований на виброустановке с U-образным контейнером и рабочим объемом – 8 л (т.е. общий объем

контейнера, как и у прочих предыдущих исследователей, – 10 л) при амплитуде 2,5 мм и частоте 34 Гц в шарах диаметром 14,3 мм были измерены ускорения, испытываемые контейнером во время работы станка, с помощью датчика, установленного на торцевой стенке в различных точках по контуру обечайки. При этом при создании математической модели было принято, что гранулы рабочей среды совершают безотрывное движение вместе с дном контейнера. Упоминает автор и о наличии циркуляционного движения всей массы загрузки, и тем самым о преобладании косых ударов гранула – деталь. В результате исследований установлено, что скорость соударения $\approx 0,76$ м/с. Это не согласуется с результатами, приведенными выше в [1]. Равномерное покрытие обрабатываемой



поверхности следами отпечатков достигает более чем за 20 минут [6] (следует обратить внимание, что в [3] положительный эффект, т.е. получение упрочненного слоя, достигается за 15 минут, т.е. на 25% быстрее). В эксперименте использовались стальные и алюминиевые образцы без указания размеров, массы и состава, что не позволяет объективно сравнить результаты с результатами предшествующих авторов. В статье указывается, что «... у большой группы материалов повышается микротвердость, степень наклепа достигает 30-40%...».

Так как долговечность и надежность многих изделий зависят от их износостойкости, то одновременно многие авторы занимались вопросами повышения износостойкости. Данные по износостойкости твердых сплавов, обработанных традиционными методами (абразивным шлифованием и алмазным выглаживанием) и вибрационным, приведенным в статье [7]. Результаты, полученные авторами, свидетельствуют о том, что «... износостойкость твердосплавного вооружения на 80-90% выше износостойкости вооружения на серийных коронках ... на упрочненных пластинках методом вибрационной обработки на 30-40%. Прочность пластин увеличилась на 25-30%». На основании результатов своих исследований авторы делают следующие выводы: «1. Упрочнение твердосплавных изделий вибрационным методом приводит к измельчению структуры на их поверхности. 2. Вибрационная обработка одновременно с увеличением прочности твердосплавных изделий приводит к повышению их износостойкости. 3. Вибрационная обработка позволяет более широко применять высокопрочные крупнозернистые твердые сплавы при равнозначной их износостойкости по сравнению с мелкозернистыми твердыми сплавами».

Аналогичные результаты по износостойкости виброупрочненных колес получены и в [8], где отмечено, что «... у упрочненных колес инкубационный период эрозии увеличивается на 40-50 часов ... долговечность на 35-40%».

Представляют интерес и результаты исследований, приведенных в [9]. Обработке подвергались детали из стали 45Г17Ю3. Результаты приведены в виде графических зависимостей (рис. 3, 4). Обработка проводилась в среде шаров из стали ШХ15 твердостью HRC 62-65, диаметром 12-14 мм, с режимами обработки: амплитуда $A=3$ мм и частота $f=24$ Гц. Естественно, результаты

отличаются от всех представленных выше. Но при этом автор сообщает и о таких результатах, которым ранее не уделялось внимание. «Особенно эффективно вибрационное упрочнение закаленных сталей. Оно снижает в поверхностном слое детали растягивающие остаточные напряжения. Интенсивное упрочнение происходит в первый час работы. При дальнейшей обработке поверхностный слой, получивший наклеп, подвергается износу и твердость падает».

Автор [9] утверждает, что существует «... две зоны: упрочненная и разупрочненная, в которых для различных значений твердости обрабатываемого материала в зависимости от продолжительности обработки происходит наклеп. В зоне упрочнения наклеп происходит без нарушения поверхностного слоя. Эта зона для различных марок материалов находится в пределах от 90 до 180 мин. В зоне разупрочнения происходит шелушение поверхностного слоя за счет перенаклепа».

Приведенные автором [9] результаты по изменению остаточных напряжений первого рода не совпадают с результатами [1] и сравнивать их некорректно, т.к. обработка проводилась, как следует из описания, на станке с контейнером объемом 200л (в 20 раз больше), с амплитудой в 2 раза больше, на деталях из иной стали (без указания размеров).

Именно работы этих исследователей, их предположения и результаты стали ориентирами для последующих экспериментаторов.

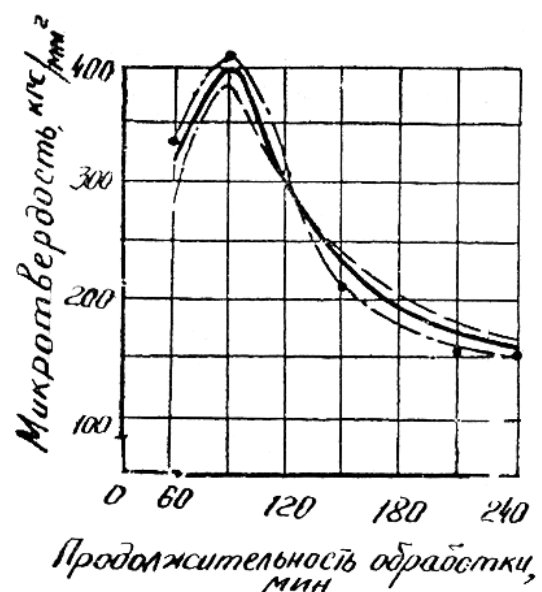


Рис. 3. Изменение микротвердости поверхностного слоя стали 45Г17Ю3 от продолжительности обработки [9]

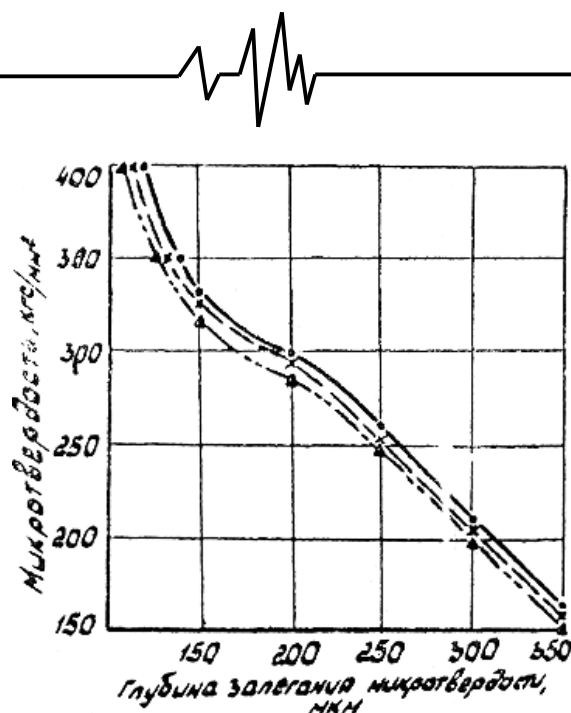


Рис. 4. Розподіл мікротвердості в поверхневому шарі сталі 45Г17Ю3 по глибині залегання [9]

В останнє 30-ліття в області віброупрочнення спостерігалися сплески підвищеної експериментаторської активності і їх зниження, але дослідження продовжувалися [10, 11, 12, 13].

Так, професор Тамаркин М.А. в своїй докторській дисертації [11] в розділі 5.4 «Формування якості поверхнього шару деталі» пише: «По результатам досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Підтверджено низькотемпературний характер видалення металу при ВиО без змінення мікроструктури поверхнього шару» (стоїть в цьому випадку згадати графіки (рис. 1, б і в) в [1] про ролі абразивної гранули).

2. ВиО сприяє певному дрібненню і більш рівномірному розподілу складових мікроструктури поверхнього шару.

3. ВиО призводить до незначительного збільшення мікротвердості поверхнього шару в межах 8-10% на глибині до 250-40 мкм».

Обробка проводилася на станку УВГ 4×10, режими: $A=2$ мм; $\omega=33$ Гц. Робоча середовище – ПТ15 і сталієві кулі діаметром 8-10 мм. Зразки були виготовлені зі сталі 45 (HRC 57-59) і мали структуру отпущенного мартенсита і з тієї ж сталі в покращеному стані (HRC 21-25) і мали сорбитну структуру (т.е. обробка проводилася на тому ж обладданні, що і у авторів [1, 3, 6]).

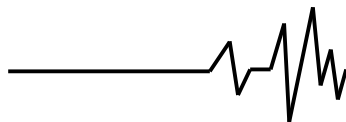
В [14] наведено результати по обробці тієї ж сталі 45. В результаті обробки циліндричних зразків в часі

1 години на вібраційній станці моделі ВМІ-1003 (об'ємом 15л) з режимами: амплітуда $A=1$ мм і частота $f=63$ Гц в середі, що складається зі сталієвих закалених полірованих куль діаметром 3-5 мм і хімічно активної розчину, мікротвердість збільшилася на 15-28% порівняно з початковою; створився упрочнений рівномірний поверхній шар зі ступенем наклепу 8-15% на глибину 30-50 мкм.

Дослідження залишкових напружень в [11] проводилося на деталях – пластинах клапанів. Деталі піддавалися обробці різними технологічними процесами. Причому як такового віброупрочнення (т.е. обробки в сталієвих кулях або роликів) не було. Були виброшлифувальні (в першому випадку ПТ15 в часі 5 годин) і потім інші операції і виброшлифувальні в ПТ10 в вібраційній станці з тороїдальним контейнером в часі 20 годин і потім підводне полірування, як пише автор, з метою упрочнення ще в часі 2 годин в середі сталієвих полірованих куль діаметром 6-8 мм. Після цього автор робить висновок, що «... ВиО зменшує величину залишкових напружень розтягнення». На наш погляд, така постановка експерименту некоректна. Далі автор розглядає вже експлуатаційні властивості деталей, перевіряючи їх на усталостне руйнування, і показує, що «... група зразків, оброблених з використанням ВиО, проработали до поломки в 8-10 разів довше, ніж початкові...».

В роботі [15] розглядалася проблема упрочнення породоразрушаючих елементів бурових долот термічної і вібраційної обробками. Вібраційна обробка виконувалася в U-образному 25-літровому контейнері в робочій середі зі сталієвих куль діаметром 8 мм з використанням хімічно активних розчинів. Режими не вказуються. Результати такі: міцність при вигині збільшилася після упрочнення на 10-20%, довговічність в 1,5 рази, міцність при осевому стисненні на 14%. Ці результати також трохи відрізняються від вище наведених.

В 1999 г. була опублікована монографія Копылова Ю.Р. «Віброударне упрочнення» [12]. В роботі наведено наступні результати: «Віброударне упрочнення, виконане після виброабразивної зачистки в середі сталієвих куль діаметром 0,5-0,6 см з помірною промывкой і оптимальним підняттям $P=0,48-0,56$ при віброускореннях $\omega^2=860-950$ см/с², частоті $\omega=96$ с⁻¹, змінює параметри шерохватості і хвилястості до наступних значень: Rz 3-



4 мкм, Rz_{max} 5-9 мкм, ΔRz_3 – 4 мкм, Sh 500-1000 мкм, Sm 2000-2500 мкм, Wz 9-10 мкм и Wz_{max} 10-16 мкм, SW 2600-3000 мкм. Микротвердость возрастает на 5-7% за счет наклепа. В поверхностном слое формируются σ_{-0} =550-680 МПа с расположением $\sigma_{-0 max}$ на глубине до 50-70 мкм, а при использовании оптимального состава технологической жидкости – на глубину 17-25 мкм....Полученные в результате виброударного упрочнения изменения показателей качества поверхностного слоя обуславливают

повышение эксплуатационных свойств отдельных деталей и изделия в целом».

С 2000 г. вновь стабильно появляются работы по изучению процесса виброупрочнения [16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24].

Так, выходит в печать монография «Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД» [25]. В монографии приводятся результаты исследований по применению вибрационного оборудования при обработке лопаток турбин из сплава ЭИ867.

Таблица 2

Результаты исследований шероховатости, наклепа и усталости лопаток [25]

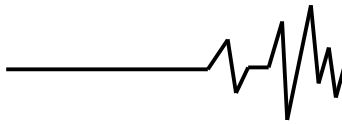
Вид обработки пера лопаток	Ra, мкм	Микротвердость поверхности, МПа	Глубина наклепа, мм	Степень наклепа, %	σ_{-1} , МПа
Виброполирование	0,6-0,7	5100	0,060	39	310
Виброполирование и диффузионный отжиг	0,6-0,7	4210	0,040	16	305
Окончательное ручное полирование	0,65-0,8	4700	0,030	29	300
Окончательное ручное полирование и диффузионный отжиг	0,65-0,8	4050	0,020	11	290

Надо отметить, что описание вибрационного станка, режимы, инструмент в монографии не отмечены. Однако на предприятии «Мотор Сич» (как в г. Запорожье, так и в его филиалах г. Снежное) работают вибрационные станки с тороидальным контейнером. По мнению авторов монографии [25], « Виброполирование, выполненное после предварительного ручного полирования, сопровождается образованием остаточных сжимающих напряжений до 200 МПа, проникающих на глубину 0,060-0,065 мм. От уровня напряжений, измеренных на серийных лопатках, они отличаются несколько меньшей величиной у поверхности и большей глубиной залегания. Внедрение новой технологии обработки пера позволило уменьшить объем ручных работ, высвободить большее количество рабочих, повысить стабильность характеристик качества поверхности и сопротивление усталости рабочих лопаток турбины из сплава ЭИ 867».

Удивительная информация изложена в небольшой по объему статье Миляевой С.В. «Вибрационное механохимическое оксидирование алюминия и его сплавов» [26].

При наличии всех выше перечисленных и других работ по виброупрочнению автор утверждает, что вибрационное механохимическое оксидирование алюминия и его сплавов в сравнении с традиционным химическим оксидированием имеет преимущество: «... это малая энергоемкость процесса, экологическая чистота технологии, отсутствие наводораживания поверхности, хорошие физико-механические и эксплуатационные свойства поверхности, низкая шероховатость, повышение микротвердости, коррозионной стойкости». С чем можно согласиться, если бы автор не утверждал, что в качестве рабочей среды использовались полиэтиленовые шары диаметром 3-4 мм. Автор не указывает режимы, но применяет традиционное вибрационное оборудование.

Позитивное влияние ВиУО при обработке сложнопрофильных деталей – шестерни $m=10$, $z=17$ из стали 20X2H4A рассмотрено в работе [14]. Данные шестерни были установлены на приспособлении в контейнере вибрационного станка модели ВМИ 1004А и подвергнуты упрочнению шариками из стали ШХ15



диаметром 3-5мм с применением химического раствора, содержащего едкий калий, триэтанолмин, олеиновую кислоту. Режимы обработки: частота 29 Гц, амплитуда 3,5 мм в течение 120 минут.

В результате обработки у образца, вырезанного из шестерни из стали 20X2H4A, под микроскопом видна четкая граница цементированного закаленного слоя у поверхности зубьев. Деформированный слой, образуемый в процессе вибрационного упрочнения стальными шариками, невооруженным глазом не наблюдался. С помощью микроскопа с увеличением в 487 раз был выявлен наклепанный поверхностный слой глубиной до 0,07 мм, представляющий собой слой мелкозернистых деформированных зерен.

При замере микротвердости по боковой поверхности зуба самое высокое значение микротвердости у поверхности на глубине 0,09 мм, далее снижается и держится на одном уровне – 1060 по глубине на 1,25 мм, а затем

резкое снижение микротвердости; при измерении микротвердости по впадине установлено, что у поверхности микротвердость ниже, чем далее по сечению, – 0,25-0,75 мм, далее микротвердость резко падает. Характер изменения микротвердости по сечению показан на рис. 5 [27].

Металлографические исследования образцов показали, что глубина деформированного слоя на рабочих поверхностях зубьев после вибрационной обработки составляет 0,25-0,3 мм и во впадине 0,15-0,2 мм. Анализ полученных данных показал, что на рабочих поверхностях зубьев после вибрационного упрочнения стальными шариками микротвердость увеличивается на 35-42%, что в значительной степени должно увеличивать износостойкость поверхности. Вибрационная обработка снимает внутренние напряжения во впадине, что также положительно сказывается на повышении долговечности зубчатых колес.

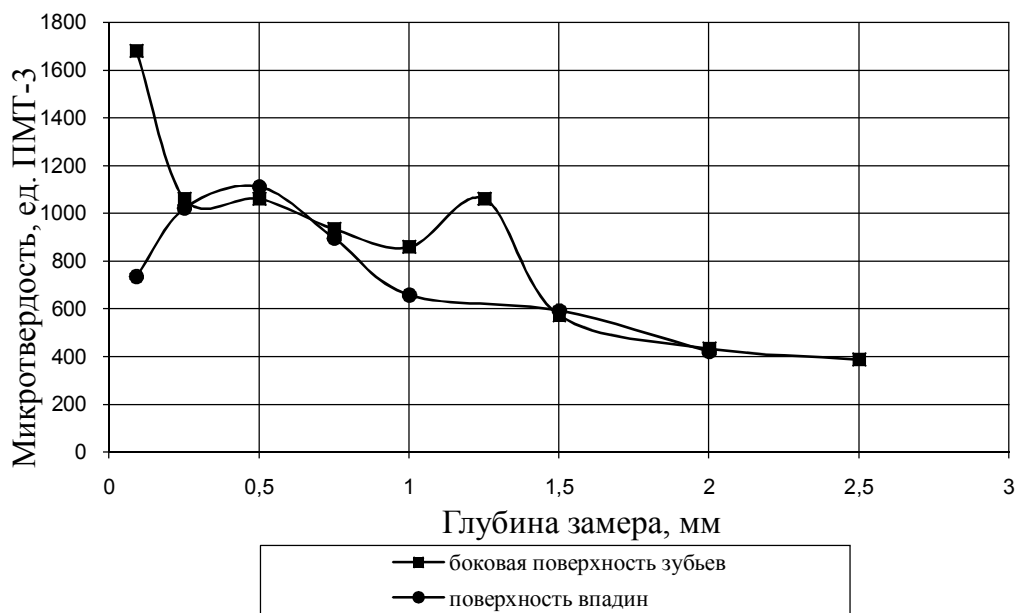
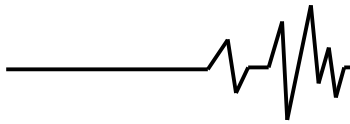


Рис. 5. Характер изменения микротвердости по сечению

В отличие [1, 3, 6] обработка проводилась в контейнерах серийно выпускаемых станков с объемом 120 л (приблизительно в 10-11 раз больше, чем в [1, 3, 6]), т.е. больше давления в рабочей среде уже в статике, в шарах, диаметр которых в 3-5 раз меньше, чем у авторов [1, 3, 6], и в течение 2 часов с химически активными растворами. И, как видно, результаты исследований также не совпадают с результатами предшествующих работ.

Огромный вклад в развитие виброударной обработки внесла ростовская школа ученых под руководством Бабичева А.П. Глубокий анализ всех факторов виброударной обработки содержится в работе [28].

Особенный интерес представляет рассмотрение микротвердости и влияние на нее различных факторов. Так авторы подчеркивают, что «... наиболее существенное влияние на микротвердость оказывают режим и продолжительность обработки, исходное состояние материала детали, характеристика



рабочей среды, температура и глубина наклепанного слоя».

Для определения глубины наклепанного слоя (а) предлагается зависимость:

$$a = \sqrt{\frac{F}{\sigma_s}},$$

где a – глубина наклепанного слоя;

F – сила соударения;

σ_s – предел текучести материала.

С этой формулой трудно не согласиться. Также в работе приводятся данные зависимости микротвердости от амплитуды и времени. Однако авторы [12, 13, 23] утверждают, что изменение микротвердости является результатом многократного воздействия, а не однократного, а это в зависимости не отражено.

Обработка осуществлялась в среде других шаров $d=8$ мм [28]. Отмечается, что использование жестких режимов ($A=4,5$ мм) и увеличение продолжительности обработки до 180 мин. приводят к перенаклепу, сопровождаемому ухудшением шероховатости и снижением микротвердости (рис. 6).

Сталь 20Х3ВМФ обрабатывалась в среде смеси стальных шаров $d=(2$ и $8)$ мм, а также в среде твердосплавных шаров $d=(5$ и $9)$ мм. Исследования показали, что обработка в среде твердосплавных шаров сопровождается более заметными изменениями структуры микротвердости в виде мелкодисперсных карбидов при толщине наклепанного слоя 400 мкм и степени упрочнения 18% (рис. 7).

Полученные результаты важны с точки зрения практического применения ВиУО и согласовывается с результатами, полученными в НИЛ «ОСА» ВНУ им. В. Даля.

Целью данного обзора не является всеобъемлющий анализ всех теоретических изысканий в области ВиУО, но наличие большого разброса получаемых результатов свидетельствует об отсутствии единой методологии проведения исследований. Данная ситуация наглядно представлена в табл. 3.

Разброс, а иногда и противоречивость результатов распространяются и на область практического применения. Рассмотрим это на примере принципиальных схем ВиУО, приведенных в работе [21].

Базовая схема ВиУО с ее разновидностями имеет характерные признаки многоконтактной обработки, где роль инструмента выполняет вибрирующая среда металлических частиц (шары, ролики, тела других форм). Схема процесса представлена на рис. 8.

Разновидностью базовой схемы ВиУО является обработка в уплотненной среде колеблющихся частиц (рис. 9). Обработка осуществляется в рабочем контейнере 1, где размещены обрабатываемые детали 8 и рабочая среда 9 (например, стальные шары). Рабочий контейнер через упругие элементы (пружины) 2 опирается на основание станка 3. Сжатие рабочей среды осуществляется экраном 7 с помощью силового механизма 6, установленного на крышке 5.

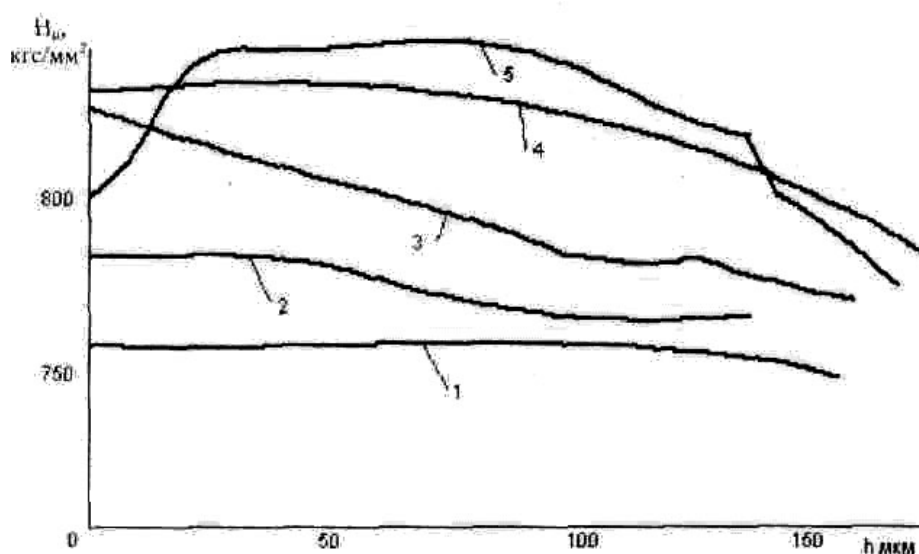


Рис.6. Изменение H_{μ} в поверхностном слое при обработке стали 30Х3ВА при $f=30$ Гц: 1 – исходная; 2 – $t=60$ мин; 3 – $t=120$ мин ($A=2,5$ мм); 4 – $t=120$ мин; 5 – $t=180$ мин ($A=4,5$ мм)

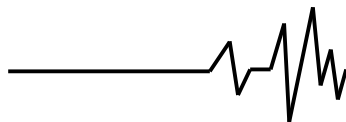
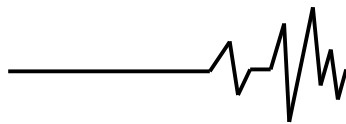


Таблица 3

Сравнительная таблица исходных данных и выходных параметров при ВиУО различных авторов

Авторы		Устинов В.П.		Ходош Б.Б.	Юркевич В.Б.	Боярских Г.А.	Волков И.В.	Калмыков М.А.	Долгатов К.М.	Тамаркин М.А.	Александрова Л.И.	Копылов Ю.Р.	Богуслаев В.А.	Бабичев А.П.
		Устинов В.П.		Ходош Б.Б.	Юркевич В.Б.	Боярских Г.А.	Волков И.В.	Калмыков М.А.	Долгатов К.М.	Тамаркин М.А.	Александрова Л.И.	Копылов Ю.Р.	Богуслаев В.А.	Бабичев А.П.
Параметры	Конфигурация, материал образцов	Сталь ШХ15, закаленная		Сталь 45Х	Стальные, алюминиевые образцы	Твердосплавные элементы	Шестерни m=10, z=17 20Х2Н4А	Сталь 45, цилиндрические образцы	Сталь 45Г17Ю3	Сталь 45	Твердосплавные элементы	Элементы оснастки вертолетов	Лопатки турбин	Сталь 20Х38МФ
		Сталь ШХ15, отожженная		Сталь 40Х, отожженная	Сталь 45Х	Стальные, алюминиевые образцы	Твердосплавные элементы	Шестерни m=10, z=17 20Х2Н4А	Сталь 45, цилиндрические образцы	Сталь 45Г17Ю3	Сталь 45	Твердосплавные элементы	Элементы оснастки вертолетов	Лопатки турбин
Масса образцов, г		50-1000												
Параметры инструмента		Шары диаметром 9-16 мм; ролики диаметром 15, 20 мм; гранулы 20-35 мм		Стальные закаленные шарики диаметром 9 мм	Шары 1,5-9 мм; ролики 15, 20 мм	Стальные шары диаметром 14,3 мм	Стальные шарики диаметром 5-6 мм ШХ15	Стальные закаленные шарики диаметром 3-5 мм ШХ15	Стальные шары ШХ15 диаметром 12-14 мм	ПТ-15; стальные шары диаметром 8-10 мм	Стальные шары диаметром 8 мм	Стальные шары диаметром 5-6 мм		Стальные шары диаметром 2, 8 мм; твердосплавные шары диаметром 5-8 мм
Режимы	Частота, f	33		25	33	34		29	63	24	33		96	
	Амплитуда, А	1,5		2	2	2		3,5	1	3	2		1	
Величина напряжения сжатия, МПа		800											550-600	310
		200-300												



Продолжение табл. 3

Параметры	Авторы			Устинов В.П.	Ходош Б.Б.	Юркевич В.Б.	Боярских Г.А.	Волков И.В.	Калмыков М.А.	Долгатов К.М.	Тамаркин М.А.	Александрова Л.И.	Копылов Ю.Р.	Богуслав В.А.	Бабичев А.П.
	100-150 250-300	50 80-110													
Глубина распространения, мкм				60					30-50	30-50			50-70	60	До 400
Износостойкость, %							> 30-40								
Скорость гранулы, м/с			0,1-0,2												
Усилие вдавливания, кг			2,15-4,3												
Объем установки, л	10			10	8		120	15	200	10	25				
Время обработки, мин				15	20		120	60	90						180
Микротвердость				300 кг/мм ²			> 35-45%	> 15-28%	420 кг/мм ²	> 8-10%			> 5-7%		> 18%
Степень наклепа, %					30-40		8-15							39	
Долговечность, %											> 1,5				
Прочность, %							> 25-30								
Химический раствор				+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Прочность при изгибе, %											> 10-20				
Прочность при осевом сжатии, %											> 14				

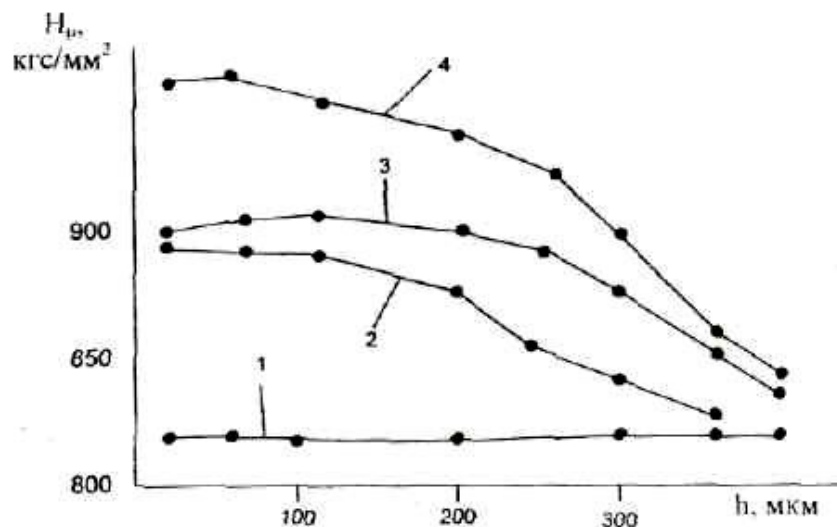
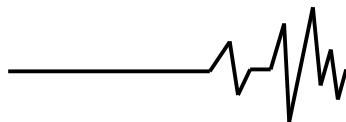


Рис. 7. Изменение H_{μ} при обработке стали 20X3VMФ при $A=4,5$ мм, $f=30$ Гц: 1 – исходная; 2 – $t=60$ мин, среда – стальные шары; 3 – $t=120$ мин, стальные шары; 4 – $t=120$ мин, твердосплавные шары

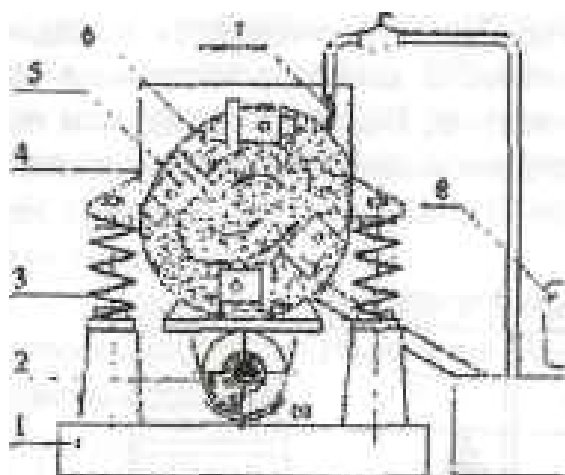


Рис. 8. Схема процесса виброударной обработки: 1 – основание; 2 – дебалансный вибровозбудитель; 3 – упругие элементы; 4 – рабочий контейнер; 5 – обрабатываемая деталь; 6 – рабочая среда; 7 – технологическая жидкость; 8 – помпа

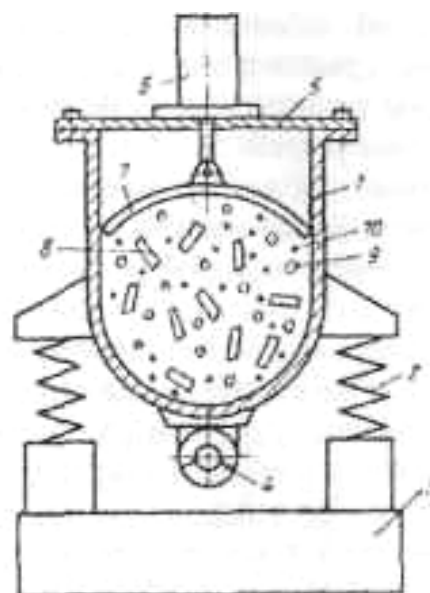


Рис. 9. ВиУО в уплотненной среде колеблющихся частиц: 1 – рабочий контейнер; 2 – упругие элементы; 3 – основание; 4 – дебалансный вибровозбудитель; 5 – крышка; 6 – силовой механизм; 7 – экран; 8 – обрабатываемые детали; 9, 10 – рабочая среда

На рис. 10 представлена схема рабочего контейнера с регулированием поджатия рабочей среды с помощью сжатого воздуха, являющаяся аналогичной разновидностью.

На рис. 11 представлена схема устройства для виброударной обработки деталей, размещенных свободно в рабочем

контейнере. Здесь размещенные на внутренней поверхности боковых стенок рабочего контейнера, подпружиненные со стороны крышки и имеющие возможность возвратно-поступательного движения в перпендикулярной основанию плоскости клинообразные пластины, по мнению авторов,

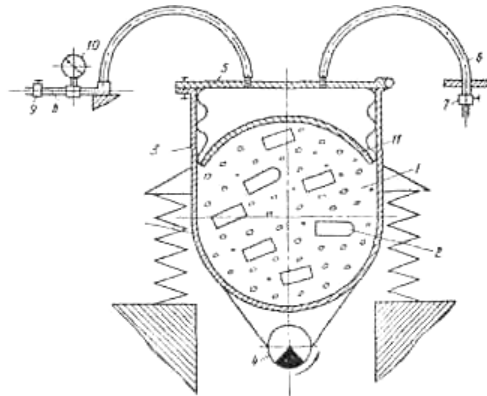
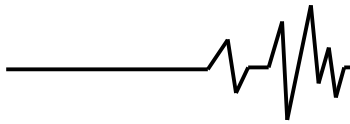


Рис. 10. Рабочий контейнер с регулируемым давлением рабочей среды:

- 1 – рабочая среда;
- 2 – обрабатываемые детали;
- 3 – рабочий контейнер;
- 4 – вибровозбудитель; 5 – крышка;
- 6 – пневмопровод; 7 – кран;
- 8 – трубопровод; 9 – кран; 10 – манометр;
- 11 – экран

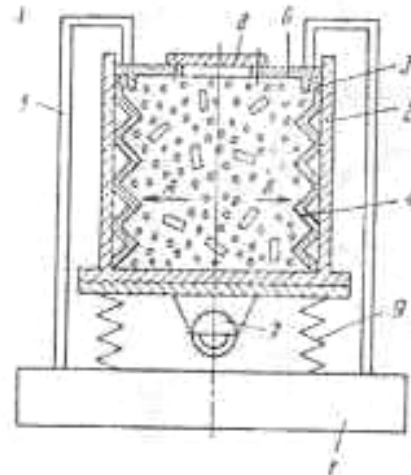


Рис. 11. Схема рабочего контейнера с клиновыми устройствами: 1 – основание; 2 – рабочий контейнер; 3 – пружина; 4 – клинья; 5 – кронштейны; 6 – крышка рабочего контейнера; 7 – вибровозбудитель; 8 – крышка люка для устройства закрепления детали; 9 – упругие элементы

обеспечивают повышение энергии динамического взаимодействия частиц рабочей среды с обрабатываемой поверхностью за счет сообщения массе загрузки дополнительных периодических ударных импульсов, а также за счет создания непостоянной во времени степени уплотнения массы загрузки, что позволяет увеличить интенсивность обработки.

Если к первым трем схемам вопросов не возникает, то по последней схеме имеются замечания. Утверждения автора о том, что циркуляция рабочей среды улучшается при применении дополнительных клиньев на внутренней облицовке контейнера, не совсем корректно. Исследования, проводимые в НИЛ ОСА, показали, что при расположении на стенках даже незначительных выступов нарушает циркуляцию среды. Это, в частности, показано в работе [29]. В экспериментальных исследованиях по определению циркуляционной скорости движения рабочей среды использовалась футеровка со вставленными в нее элементами в форме полусфер радиусом 15 и 30 мм. В результате исследований выявлено, что применение данной футеровки снизило циркуляционную скорость перемещения рабочей среды соответственно на 30% и 48%, по сравнению с обычной футеровкой (рис. 12). А следовательно, предложения об использовании боковых поверхностей контейнера в качестве дополнительного

источника энергии маловероятно. Кроме того, выступы на боковых стенках контейнера способствуют застреванию мелких деталей в пазах, и дальнейшая их обработка затруднена или невозможна.

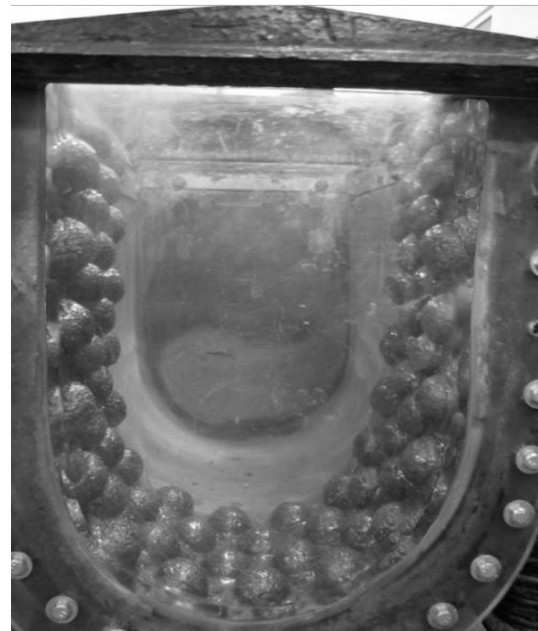
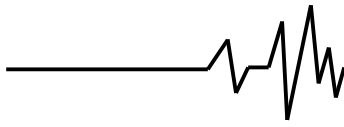


Рис. 12. Контейнер с футеровкой, выполненной в виде полусфер



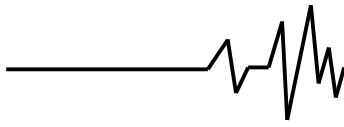
Анализ работ, проведенных вышеуказанными авторами, и вся история виброупрочнения позволяет сделать следующие немногочисленные выводы:

1. Механизм упрочнения поверхности деталей, обрабатываемых вибрационными методами, постоянно уточняется. В основе упрочнения лежит наклеп поверхности чаще всего стальными шарами. Глубина наклепанного слоя зависит от физико-механических свойств и химического состава материала, оборудования, на котором будет производиться обработка, режимов обработки, типа инструментов, времени обработки и т.д.

2. Несмотря на многочисленные исследования, в настоящее время не существует объективной методики выбора режимов операции упрочнения и управления этим процессом.

Литература

1. Устинов В. П. Изменение напряженного состояния поверхностного слоя стали в процессе вибрационной обработки / В. П. Устинов // Материалы научно-технического семинара «Вибрационное шлифование, отделка, упрочнение»: Ростов-на-Дону. – 1969. – С. 80 – 87.
2. Устинов В. П. Взаимодействие частиц рабочей среды и детали в процессе вибрационной обработки / В. П. Устинов // Материалы научно-технического семинара «Вибрационное шлифование, отделка, упрочнение»: Ростов-на-Дону. – 1969. – С. 162 – 168.
3. Ходош Б. Б. Влияние вибрационной обработки на упрочнение галтелей, фасок и острых кромок деталей / Б. Б. Ходош // Материалы научно-технического семинара «Вибрационное шлифование, отделка, упрочнение»: Ростов-на-Дону. – 1969. – С. 109 – 112.
4. Бабичев А. П. Вибрационная обработка деталей / А. П. Бабичев. – М.: Машиностроение, 1974. – 136 с.
5. Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих резервуарах / Карташов И. Н., Шаинский М. Е., Власов В. А., Румянцев Б. П., Банатов П. С., Кислица Е. С. – К.: Высшая школа, 1975. – 179 с.
6. Юркевич В. Б. Исследование скоростей, ускорений и сил соударений частиц среды с деталью при упрочнении / В. Б. Юркевич // Вибрационная обработка деталей машин и приборов: Ростов-на-Дону. – 1972. – С.67 – 77.
7. Боярских Г. А. Исследование износостойкости твердых сплавов, упрочненных вибрационным методом / Г. А. Боярских, В. И. Кармалюк, В. А. Повидайло // Вибрационная техника в машиностроении и приборостроении (тезисы докладов Всесоюзной научной конференции): Львов. – 1973. – С. 189 – 190.
8. Устинов В. П. Повышение эрозионной прочности металлических деталей вибрационным упрочнением / В. П. Устинов, В. В. Черногоров // Тезисы докладов всесоюзного научно-технического семинара «Виброабразивная обработка деталей»: Ворошиловград. – 1978. – С. 142 – 144.
9. Долгатов К. М. Упрочнение сложных поверхностей деталей судовых палубных механизмов методом вибрационной обработки / К. М. Долгатов // Прогрессивная отделочно-упрочняющая технология: Ростов-на-Дону. – 1982. – С. 57 – 62.
10. Кулаков Ю. М. Отделочно-зачистная обработка деталей / Ю. М. Кулаков, В. А. Хрульков. – М.: Машиностроение, 1979. – 216 с.
11. Тамаркин М. А. Теоретические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами: дис. ... докт. техн. наук: 05.02.08 – Ростов-на-Дону, 1995. – 300 с.
12. Копылов Ю. Р. Виброударное упрочнение: Монография. – Воронеж: Воронежский институт МВД России, 1999. – 386 с.
13. Бабичев А. П. Основы вибрационной технологии / А. П. Бабичев, И. А. Бабичев. – Ростов-на-Дону, 1999. – 622 с.
14. Волков И. В. Технологические возможности вибрационной обработки деталей на станках с U-образной формой контейнера / И. В. Волков, Ю. Ю. Дегтярева, М. А. Калмыков, А. П. Николаенко // Вісник Харківського національного університету сільського господарства імені П. Василенка: Харків.- 2006. – Вип. 42. – С. 167 – 173.
15. Александрова Л. И. Упрочнение породоразрушающих элементов буровых долот термической и вибрационной обработками / Л. И. Александрова, Г. А. Боярских, М. Г. Лошак // Вибрации в технике и технологиях. Труды III международной научно-технической конференции: Евпатория. – 1998. – С. 16 – 19.
16. Аксенов В. Н. Совершенствование процесса отделочно-упрочняющей обработки многоконтактным виброударным инструментом с учетом ударно-волновых явлений: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – Ростов-на-Дону, 2000. – 158 с.



17. Власов С.Н. Повышение работоспособности режущего инструмента путем комбинирования упрочняющей обработки: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. – Ульяновск, 2000.
18. Тарасова Е. А. Разработка и исследование способов комбинированной упрочняющей обработки для повышения эксплуатационных свойств винтовых передач: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 – Н. Новгород, 2000. – 132 с.
19. Холоденко Н. Г. Виброударная отделочная обработка гребных винтов в условиях судоремонтного производства: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08- Ростов-на-Дону, 2001.
20. Лебедев В. А. Системное проектирование операций упрочняющей обработки методами ППД / В.А. Лебедев, Г.А. Прокопец – Ростов-на-Дону, ДГТУ, 2002. – 200 с.
21. Отделочно-упрочняющая обработка деталей многоконтактным виброударным инструментом / Бабичев А. П., Мотренко П. Д. и др. – Ростов-на-Дону, изд. Центр ДГТУ, 2003. – 192 с.
22. Сухов М. В. Оптимизация технологических параметров вибрационной отделочно-упрочняющей обработки: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08- Ростов-на-Дону, 2003. – 165 с.
23. Подольский М. А. Оценка эффективности упрочнения деталей динамическими методами ППД на основе энергетического критерия: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 – Ростов-на-Дону, 2005. – 146 с.
24. Дьяченко Е. А. Повышение эффективности вибрационной обработки с учетом экологических ограничений: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 – Ростов-на-Дону, 2005. – 156 с.
25. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора. Часть I / В. А. Богуслаев, Ф. М. Муравченко, П. Д. Жеманюк, В. И. Колесников, В. К. Яценко, А. Я. Качан, Э. И. Цивирко, М. Р. Орлов, В. Е. Замковой, В. Ф. Мозговой, О. В. Рубель – Запорожье: изд-во ОАЛ «Мотор Сич», 2003. – 396с.
26. Миляева С. В. Вибрационное механохимическое оксидирование алюминия и его сплавов / С. В. Миляева // Вопросы вибрационной технологии: Ростов-на-Дону. – 2001. – С. 75 – 76.
27. Волков И. В. Повышение производительности процесса вибрационной обработки деталей на отделочных и упрочняющих операциях: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Волков Игорь Владимирович. – Луганск, 2008. – 174 с.
28. Применение вибрационных технологий для повышения качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей: Науч. издание / Под ред. А. П. Бабичева. – Ростов-на-Дону:, 2006. – 213 с.
29. Бранспиз Е. В., Лубенская Л. М., Мелконов Г. Л. Исследование увеличения съема металла с деталей, обрабатываемых на ВиО-станках с U-образным контейнером, с покрытием стенок абразивным материалом / Е. В. Бранспиз, Л. М. Лубенская, Г. Л. Мелконов // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – 2009. – № 2 (55). Ч.1. – С. 56-59.