



THE INFLUENCE OF DISLOCATIONS ON THE LATENT TECHNOLOGICAL ENERGY OF MACHINE PARTS

З. А. Шодмонкулов

Ташкентский институт текстильной и легкой
промышленности, Узбекистан

Abstract

A dislocation model for the formation of technological residual stresses is presented, and its intensity is evaluated through an energy criterion of the surface layer quality of machine parts – the latent (stored) deformation energy. Abrasive blasting of the side surfaces of the teeth of saw blades of a cotton processing machine with black silicon carbide particles is proposed. The required processing quality is achieved by forming an effective microrelief on the treated surface.

Keywords: Residual micro- and macrostresses, dislocation, dislocation density, plastic deformation, structural elements, structural-energy model, latent energy, strain hardening, stress intensity, saw blade, abrasive blasting.

Аналитические исследования параметров качества поверхностного слоя, в частности, важнейшего параметра — остаточных напряжений и построение адекватных моделей, описывающих реальный процесс упругопластического деформирования металлов при механической обработке деталей, являются актуальными наряду с экспериментальными исследованиями.

Ценность аналитических исследований, выполненных с учетом обоснованных допущений и математических моделей, а также подтвержденных экспериментально, заключается в возможности разработки универсального подхода для раскрытия механизма формирования качества поверхностного слоя деталей. Данное направление охватывает знания смежных и взаимосвязанных дисциплин (теория



дислокаций физики твердого тела, теория упругости и пластичности, термодинамика необратимых процессов, теплофизика) и ставит целью синтезировать микро- и макропредставления о пластической деформации металла [1-2].

Технологические остаточные напряжения возникают при одновременном действии различных факторов: механических, тепловых и физико-химических. Формирование и распределение остаточных макронапряжений в поверхностном слое деталей после обработки резанием в первом приближении объясняют действием двух факторов - силового (пластического деформирования), обеспечивающего возникновение сжимающих напряжений, и теплового (нагрева поверхностного слоя), являющегося причиной образования растягивающих остаточных напряжений.

При обработке резанием и ППД вследствие трения между контактными поверхностями инструмента и обрабатываемой поверхностью детали ее внешний поверхностный слой подвергается пластической деформации растяжения, а слой материала, расположенный ниже, растягивается упруго. После прохождения инструментом рабочей зоны упруго растянутый внутренний слой стремится сжаться, но этому препятствует наружный пластически деформированный слой. В итоге во внешнем слое формируется напряжение сжатия, а во внутреннем – растяжения [3].

В результате нагрева, сопровождающего любой процесс пластической деформации, внешний слой металла стремится удлиниться, однако этому препятствует более холодный внутренний слой. При интенсификации процесса напряжения на поверхности могут превзойти предел текучести обрабатываемого материала. В течение последующего охлаждения во внешнем слое формируется остаточное напряжение растяжения, а во внутреннем - напряжения сжатия.

Остаточные макронапряжения обусловлены наличием в металле различных дефектов структуры, в первую очередь линейных несовершенств в виде дислокаций, дислокационных стенок (граней блоков и ячеек), которые вызывают деформацию и напряжения. Причиной образования макронапряжений является также неизбежное взаимодействие зерен между

собой. Реальное поликристаллическое тело обладает анизотропией механических свойств и произвольной ориентацией зерен, что инициирует неодинаковую степень деформации соседних зерен и появление в них остаточных микронапряжений [4].

Рассмотрение структурных уровней деформаций дает ключ к описанию единой физической сущности механизма пластического течения кристаллического тела. Каждый структурный уровень испытывает макродеформацию относительно нижестоящего уровня и микродеформацию по отношению к вышестоящему уровню (рис. 1, 2).

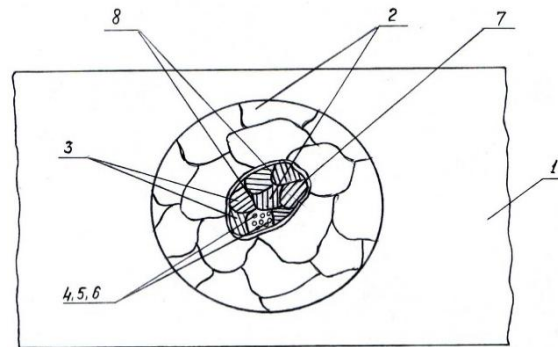


Рис. 1. Структурные элементы кристаллического тела (металла или сплава): 1- образец; 2 - зерна; 3 - блоки мозаики; 4,5,6 - дислокации, атомы, электроны

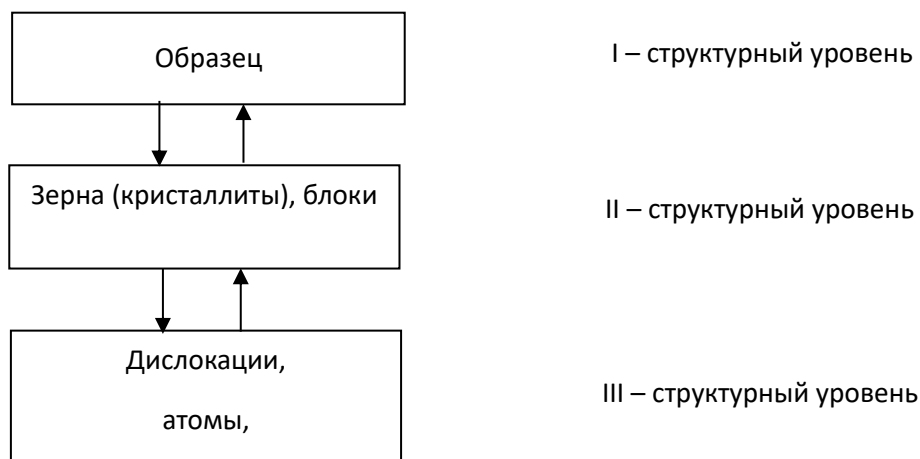


Рис. 2. Иерархия структурных уровней деформаций для поликристаллического тела



В физике твердого тела механические напряжения в металле или сплаве независимо от вызывающих их причин рассматриваются как следствие искажения кристаллической решетки. Следовательно, для технологических остаточных макронапряжений может существовать только единственная физическая модель механизма формирования этих напряжений - атомная или дислокационная модель.

Величина и знак остаточных макронапряжений зависит от дислокационной структуры, характеризующейся плотностью и законом распределения дислокаций. Большое скопление однородных дислокаций на параллельных плоскостях скольжения вызывает деформацию кристаллической решетки, ведущую к формированию остаточных макронапряжений в данном объеме поверхностного слоя металла [5-6].

Почти вся энергия, запасенная в кристалле в процессе его пластической деформации, приходится на энергию деформации, вызванной образовавшимися линейными дефектами кристаллической решетки - дислокациями. Таким образом, основным источником аккумуляции скрытой энергии являются линейные несовершенства кристаллической структуры металла - сеть дислокационных линий, которые приводят к упругим искажениям и, следовательно, к созданию остаточных напряжений. На базе многочисленных экспериментальных и аналитических исследований предложено рассматривать скрытую энергию деформирования как комплексный энергетический критерий качества при обработке резанием. Установлено влияние уровня и характера распределения скрытой энергии деформирования на такие физико-механические параметры состояния поверхностного слоя, как микротвердость, степень деформационного упрочнения, а также точность и шероховатость обработанной поверхности [7].

Установлено, что отожженные металлы содержат от 10^6 до 10^8 дислокаций/ см^2 , а в деформированных металлах плотность дислокаций выше и вероятное число их достигает 10^{11} - 10^{12} на 1 см^2 . Характер изменения скрытой энергии в зависимости от глубины поверхностного слоя аналогичен характеру изменения остаточных напряжений (рис. 3).

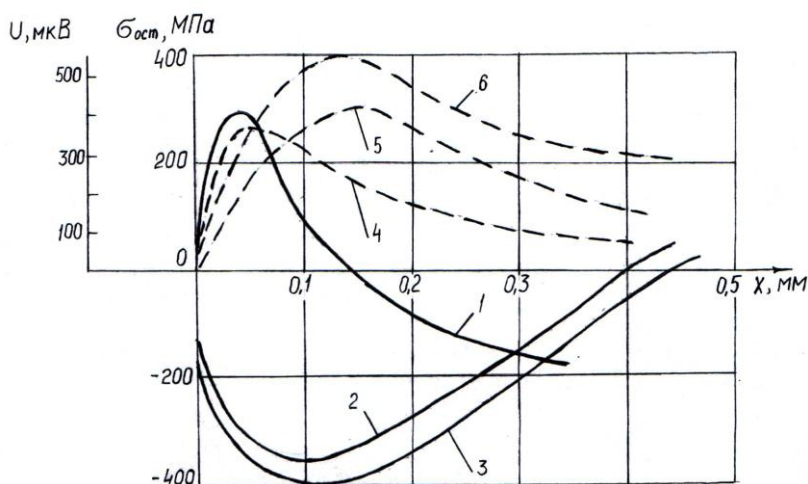


Рис. 3. Зависимость скрытой энергии и остаточных напряжений от глубины

Интенсивность остаточных напряжений при дробеударном упрочнении зубьев пильных дисков из инструментальной углеродистой стали У8Г определяли при режиме обработки: скорость дроби $v=40$ м/с, диаметр дроби $D=1$ мм. Уровень интенсивности остаточных напряжений составил в зависимости от глубины поверхностного слоя: $\sigma_{ioc}=1094$ Н/мм² при $z=0,05$ мм; $\sigma_{ioc}=1082$ Н/мм² при $z=0,1$ мм; $\sigma_{ioc}=933$ Н/мм² при $z=0,2$ мм.

Расчетный метод определения скрытой энергии деформации, основанный на дислокационных представлениях процесса пластической деформации металлов при механической обработке, создает научно обоснованную базу для установления взаимосвязи микро- и макроскопических масштабах формирования технологических остаточных напряжений в поверхностном слое деталей машин.

Экспериментальная часть. Экспериментальные исследования абразивоструйной обработки были проведены с использованием в качестве абразива карбида кремния черного (КЧ) зернистостью 40 (рис. 4). В любом объеме абразива имеются частицы, отличающиеся по размерам в несколько раз. При этом все абразивные частицы обладают множеством острых кромок, выполняющих роль режущих клинов с различной геометрией и

способных осуществить микрорезание с образованием микронеровности поверхности [8].

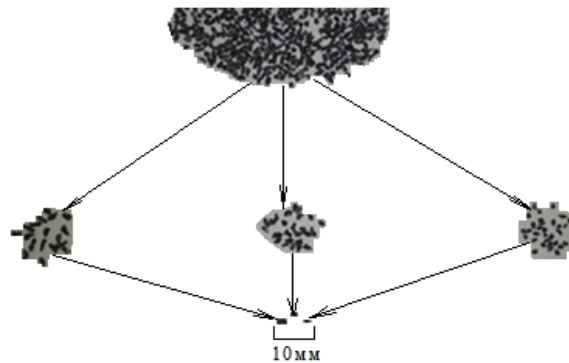


Рис. 4. Фракционный состав карбида кремния черного зернистостью 40
Исследования процесса абразивоструйной обработки зубьев пильного диска для линтеров были проведены на экспериментальной установке (рис. 5) при следующих условиях и режимах обработки: давление воздуха $p=0,1...0,4$ МПа; угол атаки $\alpha=15...60^\circ$; абразивная частица — КЧ зернистостью 40. Материал пильных дисков — углеродистая инструментальная сталь У8Г ($\sigma_v = 1150$ Н/мм²; твердость HRA 67-70).



Рис. 5. Экспериментальная абразивоструйная камера и ее характеристики

На рис. 6 и 7 показаны расчетные значения высоты неровностей H (мкм) в зависимости от давления сжатого воздуха p (атм) и угла атаки α (град) частиц при абразивоструйной обработке боковых поверхностей зубьев линтерных пил. Наблюдается значительный прирост высоты неровности H при изменении давления воздуха от $p=2$ до 4 атм для угла атаки абразивных частиц $\alpha=60^\circ$: H возрастает от значения 1,84 мкм до 3,18 мкм.

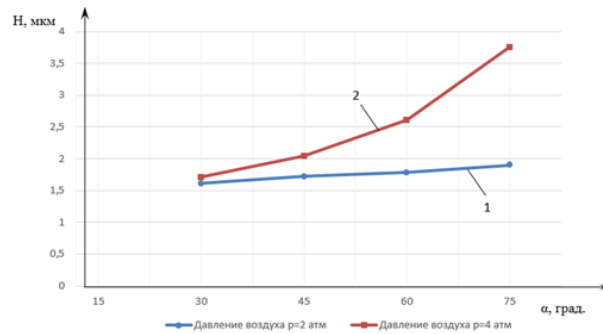


Рис. 6. Зависимость высоты неровности H от угла атаки α при абразивоструйной обработке

1 - давление воздуха $p=2$ атм.; 2 - давление воздуха $p=4$ атм.

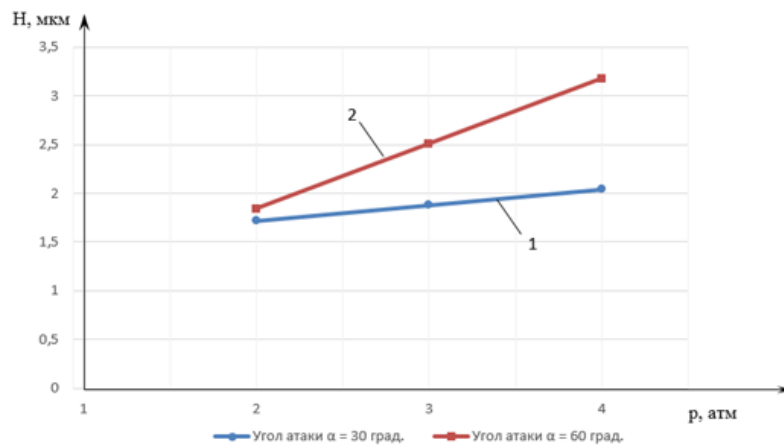


Рис. 7. Зависимость высоты неровности H от давления воздуха p :

1 - угол атаки $\alpha=30^\circ$; 2 - угол атаки $\alpha=60^\circ$

Как и следовало ожидать, повышение давления p (силовой нагрузки) и угла атаки α неизбежно приводит к возрастанию высоты сформированной неровности H как результат силового контактного взаимодействия абразивной частицы с металлической поверхностью. Однако для интенсификации процесса линтования важным является создание микропрофиля рабочей поверхности зубьев с большими шагами неровностей, что возможно, если абразивные частицы ударяются о металлическую поверхность под углом $\alpha=45^\circ$.

Экспериментальные исследования неровности поверхности, сформированной после абразивоструйной обработки, были проведены на

образцах, вырезанных из пильного диска для линтера методом атомно-силовой микроскопии (рис. 8-10).

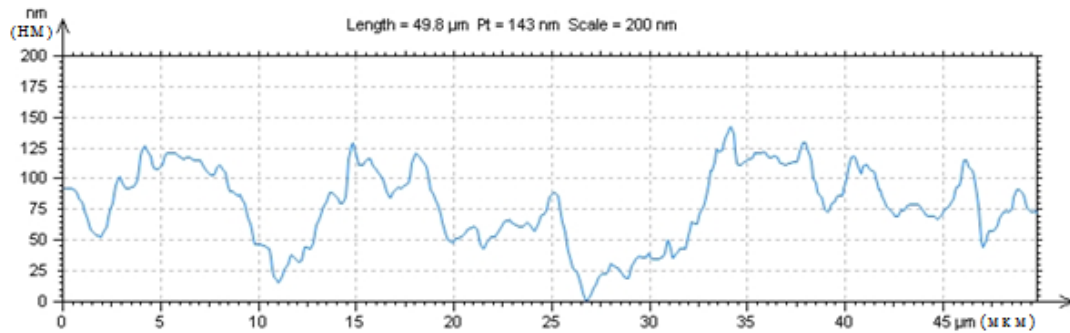


Рис. 8. Сканированный профиль боковой поверхности зуба без обработки, длина сканирования 49,8 мкм

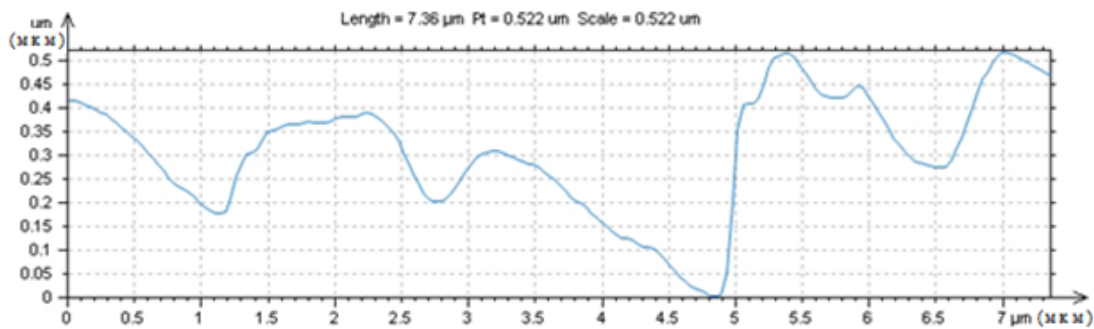


Рис. 9. Сканированный профиль боковой поверхности зуба без обработки, длина сканирования 7,36 мкм

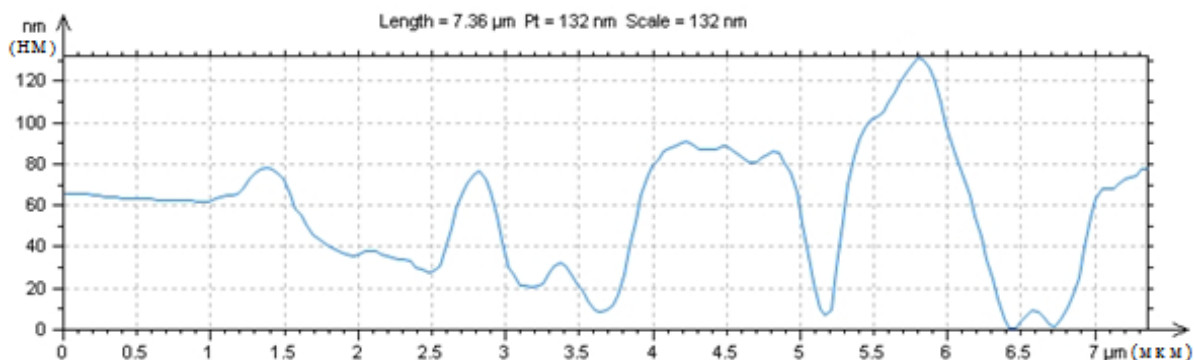


Рис. 10. Сканированный профиль боковой поверхности зуба без обработки, длина сканирования 7,36 мкм

Другая качественная и количественная картина сканированных профилей поверхностей зубьев пильных дисков для линтера после абразиво-струйной обработки представлена на рис. 11 и 12.

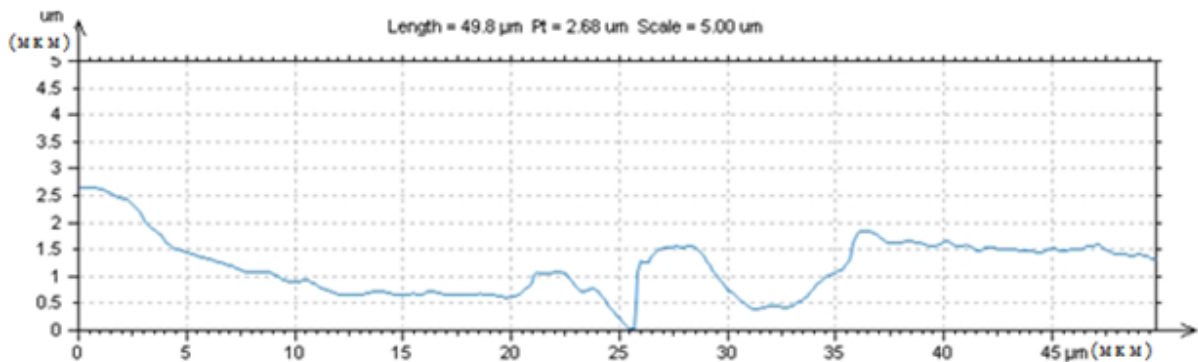


Рис. 11. Сканированный профиль боковой поверхности зубьев линтерных пил после абразивоструйной обработки (давление $p=3$ атм, угол атаки $\alpha=15^{\circ}$)

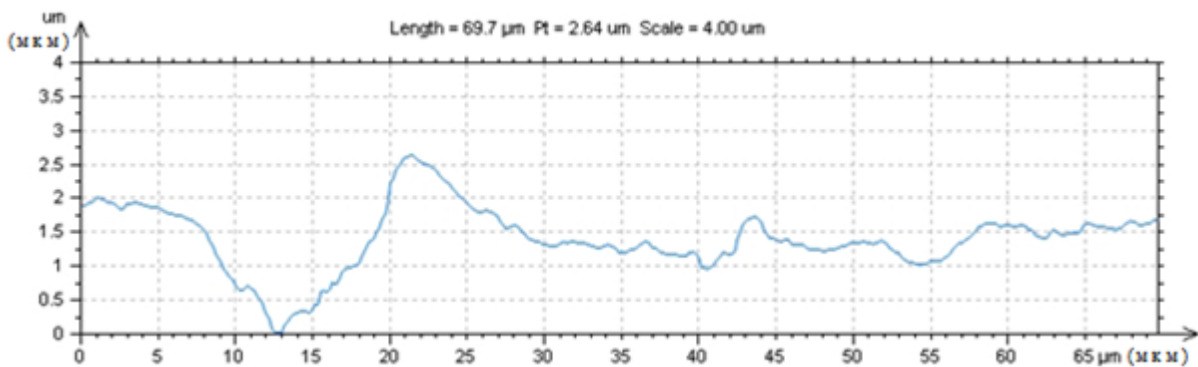


Рис. 12. Сканированный профиль боковой поверхности зубьев линтерных пил после абразивоструйной обработки (давление $p=3$ атм, угол атаки $\alpha=45^{\circ}$)

Методом атомно-силовой микроскопии установлено, что для пильных дисков без обработки максимальная высота неровности равна $H=0,143$ мкм, а средний шаг микронеровностей по вершинам не превосходит $S=8-9$ мкм на длине сканирования 49,8 мкм. Совершенно очевидно, что подобная поверхность при контакте с массой хлопковых семян при линтеровании не способна активизироваться и участвовать в дополнительном срезании



оставшихся волокон, т.к. размеры локальных контактных участков не соизмеримы с поперечным размером хлопковых волокон [9].

В пределах длины сканирования 49,8 и 69,7 мкм для обработанных зубьев имеются максимальные значения высоты неровностей соответственно равные 2,68 и 2,64 мкм, т.е. на порядок больше, чем на необработанных зубьях. Но главным результатом абразивоструйной обработки зубьев линтерных пил является образование микропрофиля со значительным шагом неровности ($S > 20$ мкм), превосходящим в несколько раз соответствующий шаг необработанных зубьев и сопоставимым с диаметром хлопковых волокон (при $d = 20$ мкм) [10].

Составлено технологическое условие ($S \geq nd_p$) для активизации боковых поверхностей зубьев за счет дополнительного среза коротких волокон с семян образовавшимися неровностями микропрофиля при абразивоструйной обработке. Экспериментально доказано, что на необработанных зубьях пыльных дисков срезанные волокна с семян в основном сконцентрированы на вершине зуба. На зубьях после абразивоструйной обработки большое количество волокон после их среза зафиксированы на боковых поверхностях с образовавшимися микронеровностями.

Выводы

1. Представлена дислокационная модель формирования технологических остаточных напряжений, позволяющая связать микро- и макроуровни деформации металла через структурно-энергетический подход.
2. Установлена корреляционная связь между плотностью дислокаций и интенсивностью остаточных напряжений через энергетический критерий — скрытую энергию деформации.
3. Абразивоструйная обработка боковых поверхностей зубьев линтерных пил формирует эффективный микрорельеф с высотой неровности 2,64-2,68 мкм и шагом более 20 мкм, обеспечивающий активизацию боковых поверхностей при линтеровании и дополнительный срез коротких волокон с семян.



Литература

1. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. М.: Машиностроение, 1988. 240 с.
2. Технологические остаточные напряжения / Под ред. А.В.Подзея. М.: Машиностроение, 1973. 216 с.
3. Панин В.Е. и др. Структурные уровни пластической деформации и разрушения. Новосибирск: Наука, 1990. 255 с.
4. Костецкий Б.И., Линник Ю.И. Исследование энергетического баланса при внешнем трении металлов // Машиноведение. 1968. №5. С.82-94.
5. Павлов П.В., Хохлов А.Д. Физика твердого тела. М.: Высшая школа, 1985. 384 с.
6. Шин И.Г. Структурно-энергетический подход при оценке остаточных напряжений в поверхностном слое деталей // Республ. науч.-техн. конф. Наманган: НИЭИ, 1996. С. 290-291.
7. Новиков И.И., Розин К.М. Кристаллография и дефекты кристаллической решетки. М.: Metallurgy, 1990. 336 с.
8. Кравченко Б.А., Нерубай М.С., Курицын В.Н. Об оценке запасенной энергии пластической деформации при резании и упрочнении. Куйбышев: КуАИ, 1980. С.133-136.
9. Шодмонкулов З.А., Шин И.Г. Атомно-силовая микроскопия поверхностей зубьев лентерных пил после абразивоструйной обработки // Респуб. науч.-практ. конф. Ташкент, 2019. С. 138-141.
10. Shodmonkulov Z.A., Atakhanov A.A., Gulamov A.E., Shin I.G. Abrasive blasting of the teeth of linter saws with the aim of their activation // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. 2019. Vol. 6. Issue 8.