

## **ВЛИЯНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННО-ИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ**

*Г.И.Костюк д-р техн. наук, Бруяка О.О., Мисяк К.П.*

*Национальный аэрокосмический университет*

*Филиал Донецкого технического университета*

*Завод им. Малышева*

Исследовано влияние лазерно-плазменно-ионной обработки на свойства покрытия TiN и поверхностного слоя (структура и микротвердость) на стали 20, 12ХНЗА и быстрорежущей стали Р6М5. Показана возможность комбинированного упрочнения стали Р6М5, позволяющая повысить стойкость режущего инструмента более 2,5 раз по сравнению с Р6М5 с покрытием TiN.

### **Введение.**

Применение покрытий позволяет существенно повысить эксплуатационные характеристики деталей [1-8]. В тоже время сочетание ионно-плазменных покрытий и лазерным упрочнением и (или) лазерным отжигом покрытий [7] может существенно повысить стойкость режущего инструмента, а также появляется вероятность создания наноструктур в поверхностном слое детали или РИ или в покрытии [8]. Все это говорит о важности исследования микроструктуры материалов при лазерном облучении и при последующем нанесении покрытия, а также при лазерном отжиге покрытия.

Лазерная обработка сталей и сплавов привлекает внимание к себе в качестве составляющей комбинированных технологий. Методы лазерной обработки образуют группы технологий, основанные на нагреве, плавлении и шоковом (ударном) нагружении материала за счет действия температурных напряжений и в зависимости от плотности излучения лазера, времени его воздействия может осуществлять закалку, модификацию материала.

Нагрев определяет такие процессы, как отжиг материала, а также наиболее распространенный метод лазерного поверхностного упрочнения – фазовое превращение в твердом состоянии в поверхностных слоях металлов и сплавов при очень быстром нагреве и последующем охлаждении. При рассмотрении этого метода сюда также следует отнести и упрочнение посредством закалки из жидкого состояния. Плавлением можно осуществлять и поверхностное легирование.

### **Состояние вопроса.**

Поверхностное упрочнение металлов и сплавов можно проводить и путем ударного упрочнения, облучая изделия «гигантскими» импульсами излучения. К особенностям воздействия такого излучения на материалы следует отнести локальную закалку сталей, местный наклеп, обусловленный возникающими импульсами давления в зоне обработки, травление поверхности газовыми и ионными струями, вылетающими из зоны обработки и др. Ударное воздействие требует максимальной плотности теплового потока  $10^{12} \dots 10^{14}$  Вт/м<sup>2</sup> при минимальной длительности воздействия излучения на поверхность  $10^6 \dots 10^8$  с. Лазерное упрочнение, основанное на фазовых превращениях в поверхностном слое, требует минимальной плотности потока излучения лазера  $10^7 \dots 10^8$  Вт/м<sup>2</sup> при максимальном времени его воздействия 0,02...1 с.

При создании износостойких покрытий выяснилось, что долговечность последних возрастает с увеличением твердости поверхностных слоев подложки, находящихся под покрытием. Поэтому облучение поверхностей изделий лазерным излучением может быть использовано для улучшения износостойкости покрытий, наносимых методом КИБ.

В данной работе описаны результаты исследований воздействия лазерного излучения на поверхность образцов до или после нанесения пленок нитрида титана.

Источник лазерного излучения – лазер ГОИ–16 (ЛТИ–502) работающий в многоимпульсном режиме при длительности импульса 300 нс. Диаметр светового пучка ( $d = 0,32$  мм), частота – 5 кГц, скорость подачи – 200 нм/мин. Плотность энергии, падавшей на поверхность образца ( $7,5 \cdot 10^{11}$  Вт/м<sup>2</sup>), изменяли посредством расфокусировки луча лазера.

Использовались образцы из сталей 20, 12ХНЗА, Р6М5, которые шлифовались, затем полировались алмазными пастами до зеркального состояния, обезжиривались и на них, при воздействии лазерного излучения, формировались квадраты со стороной 10 мм так, чтобы следы лазера перекрывались на 1/3. Пленку нитрида титана наносили на установке «Булат – б». Морфологию пленок и поверхностей исследовали на оптическом микроскопе «Neofot», низковольтном растровом электронном микроскопе, измеряли микротвердость на микротвердомере ПМТ–3, а состав поверхностного слоя исследовали на рентгеновском дифрактометре «Дрон–3М» в излучении СО в угловом диапазоне от 30° до 160 °С.

Стойкость РИ из Р6М5 с лазерно-плазменно-ионным комбинированием упрочнением исследовалась по критическому возрастанию силы резания, определяемому по динамометру УДНОО с СИИТ.

#### Результаты исследования.

Исследовались морфология поверхности после действия лазерного облучения на стали 20, 12ХНЗА и Р6М5. Так для стали 12ХНЗА; где видно, что в зоне действия лазера реализуются условия для упрочнения, где микротвердость повысилась в 3,5 раза

#### Результаты эксперимента.

Фото следа от облучения лазером подложки приведен на рис. 1.

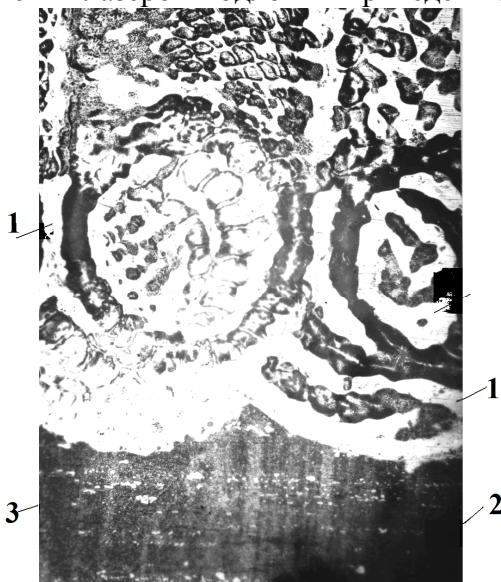
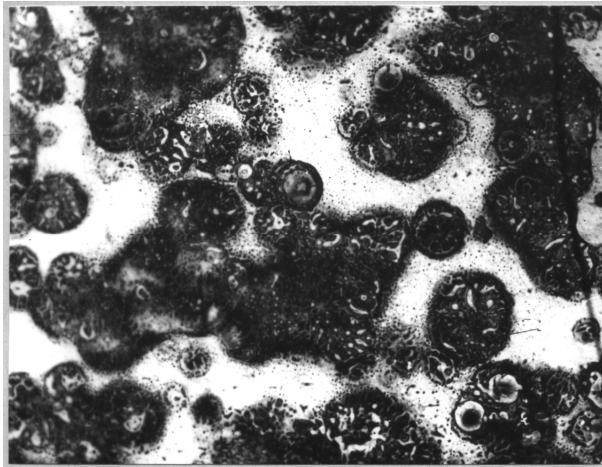
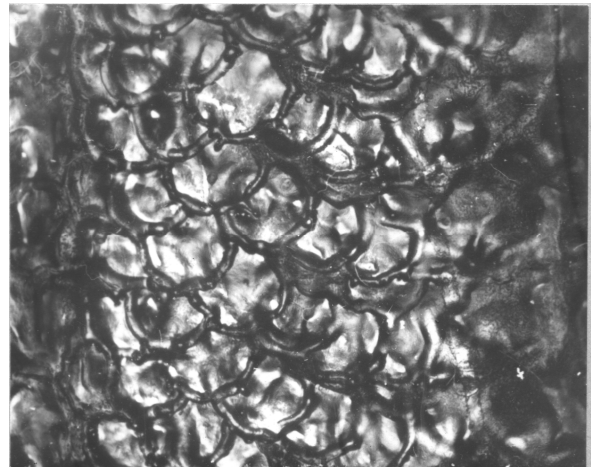


Рис. 1. След луча лазера на подложке, увеличение в 160 раз: материал - сталь 12ХНЗА,  $\Delta f = -1$  мм: 1 - след луча лазера,  $H_{100} = 7058$  МПа; 2 - подложка,  $H_{100} = 2020$  МПа; 3 - карбидная неоднородность подложки

На рис. 2 показано, как влияет расфокусировка  $\Delta f$  на микротвердость поверхности образца при обработке последнего лазерным излучением.



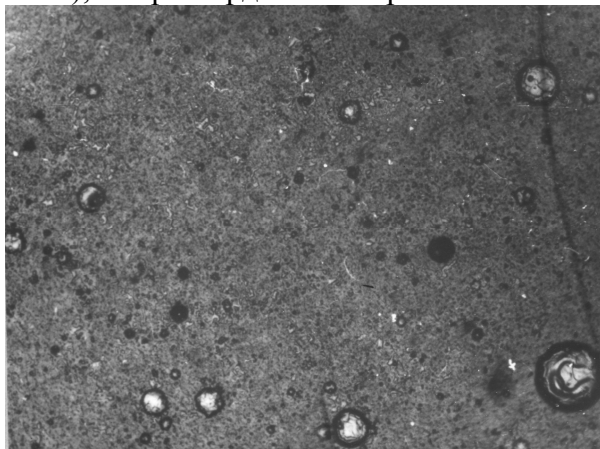
а



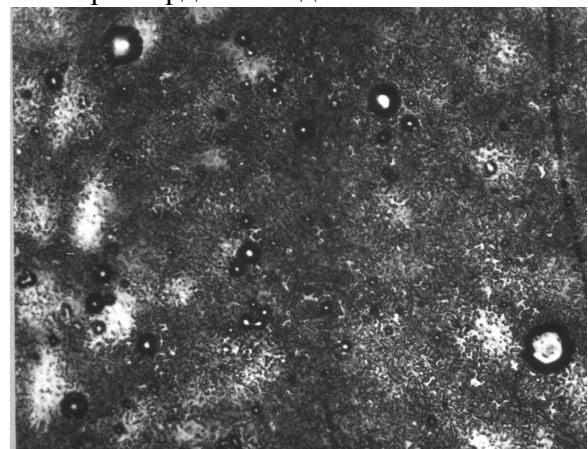
б

Рис. 2. Характер воздействия луча лазера на сталь 12ХН3А (подложка) при различных расфокусировках, увеличение в 340 раз: а –  $\Delta f = -2$  мм; б –  $\Delta f = -1$  мм

Как видно, существует оптимальная расфокусировка в диапазоне  $\Delta f = -(2...2,5)$  мм, при которой микротвердость обработанной лазерным излучением поверхности максимальна. При расфокусировке, равной  $\Delta f = -0,75$  мм, поверхность образца испаряется, а при  $\Delta f = 1$  мм и более на микрофотографии четко видны зоны расплавления (рис. 3), микротвердость которых намного больше микротвердости подложки.



а



б

Рис. 3. Влияние лазерного излучения на сталь 20, увеличение в 400 раз: а –  $I_p = 80$  А,  $I_{\pi} = -1100$  В,  $\tau_{ис} = 15$  мин,  $H_{осн} = 1577$  МПа; б – Рис. , б –  $\Delta f = 2$  мм,  $H_{лy} = 2071$  МПа

Если после обработки лазерным излучением (при  $\Delta f = 1$  мм) поверхность стали 12ХН3А имеет блестящий чешуйчатый вид (рис. 3, б), то при  $\Delta f = 2$  мм оплавлению подвергнуты отдельные участки поверхности, имеющие вид кратеров (рис. 3, а).

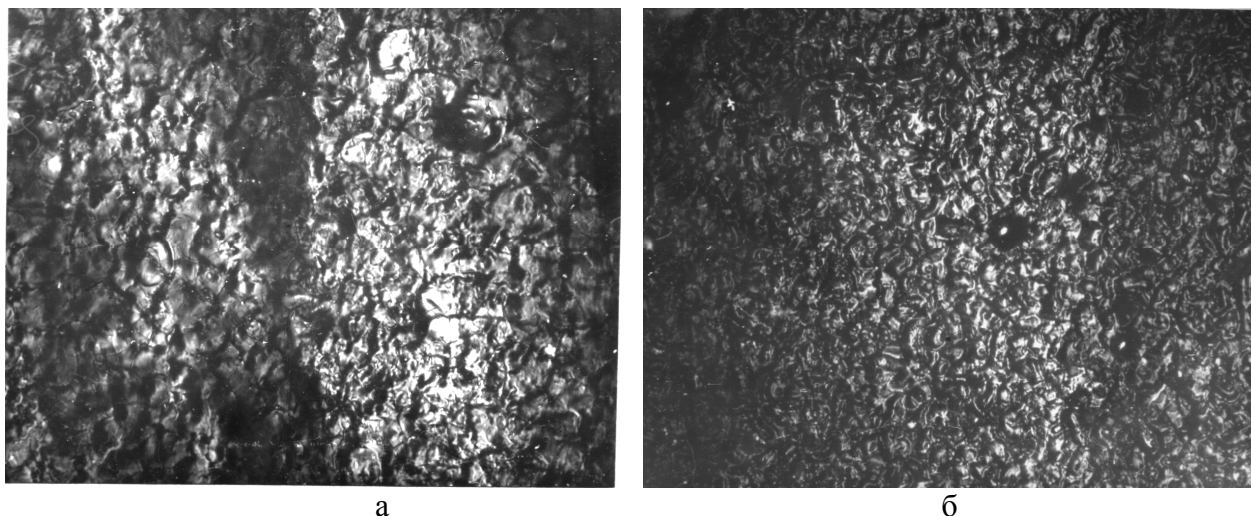


Рис. 4. Влияние лазерного излучения на сталь 20, подвергнутую ионной бомбардировке, увеличение в 400 раз: а –  $\Delta f = -1,5$  мм,  $H_{100 \text{ осн}} = 2356$  МПа,  $H_{100 \text{ лу}} = 2160$  МПа; б –  $\Delta f = -1,5$  мм,  $H_{100 \text{ осн}} = 2356$  МПа,  $H_{100 \text{ лу}} = 2071$  МПа, изношенный катод

При лазерном облучении поверхности образца из стали 20, предварительно подвергнутую ионной бомбардировке, до появления на ней пленки титана (рис. 4, а), с  $\Delta f = -2$  мм, крупные капли  $\alpha$ -фазы становятся более мелкими, дробятся, а очень мелкие стягиваются в более крупные, матовая поверхность приобретает узорчатый характер (рис. 4, б).

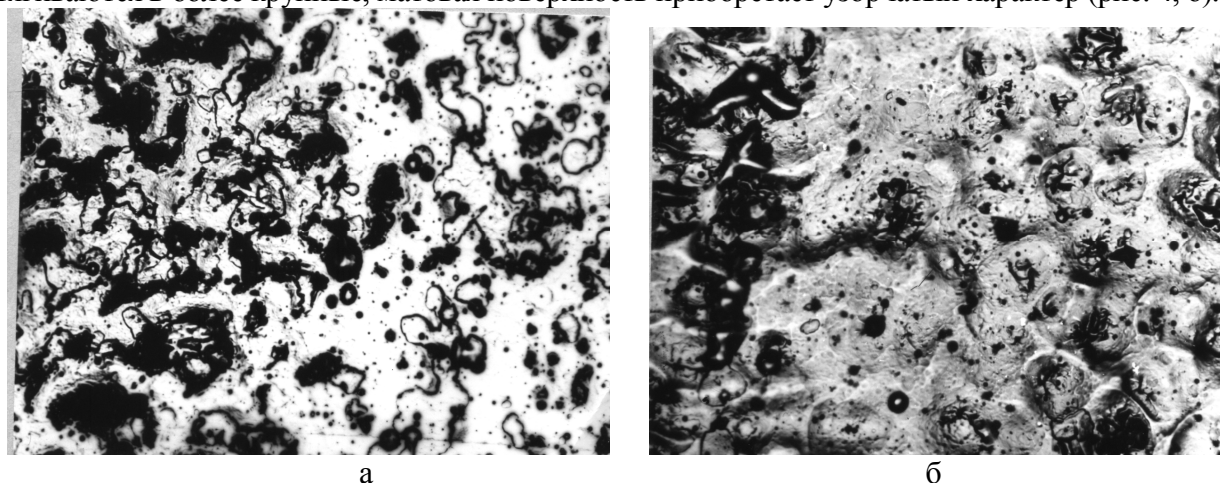


Рис. 5. Микроструктура покрытия из TiN, нанесенного на сталь 20, Р6М50, обработанную ЛИ, увеличение в 400 раз: а –  $\Delta f = -2,5$  мм,  $H_{100} = 3485$  МПа,  $P_{N_2} = 0,2$  Па; б –  $\Delta f = -2$  мм,  $H_{100} = 2705$  МПа,  $P_{N_2} = 0,4$  Па

Поверхность облучения на воздухе приобретает золотистый цвет. Как видно из дифрактограмм, в титановом слое происходят химические преобразования – образуется TiC, титан, выгорает первичный титан, появляются следы  $Fe_2O_3$ ,  $Fe_2O_4$ .

Облучение лазером такой же поверхности, но с расфокусировкой  $\Delta f = -1,5$  мм приводит к ее оплавлению с образованием чешуйчатой структуры, на которой все же остаются отдельные капли  $\alpha$ -фазы (рис. 5).

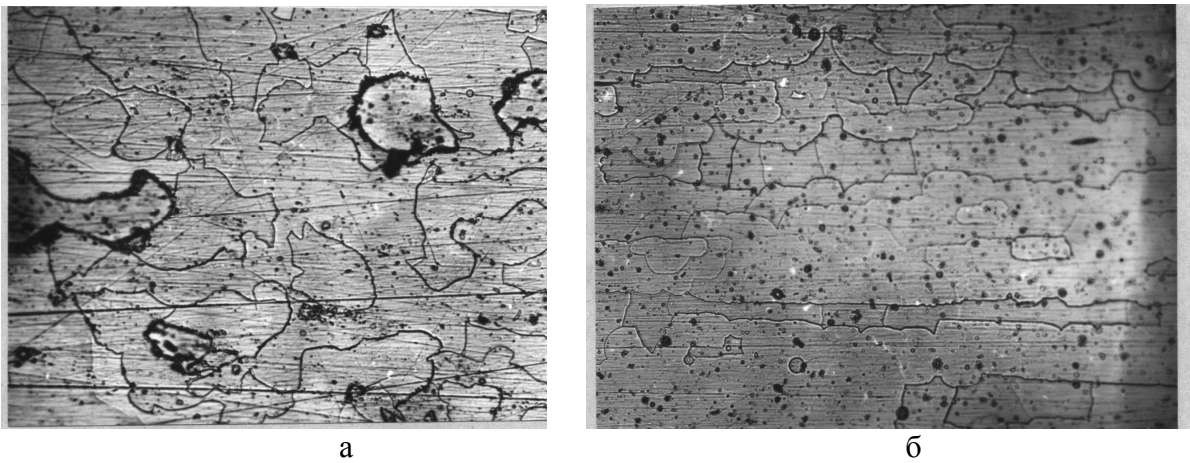


Рис. 6. Влияние повышения температуры подложки при осаждении покрытия на его структуру, увеличение в 400 раз: а – сталь 20,  $H_{100} = 2580$  МПа;  $P_{N_2} = 0,8$  Па; б – сталь P6M5K5,  $H_{100} = 2840$  МПа;  $P_{N_2} = 0,1$  Па

Поскольку с нового катода  $\alpha$ -фаза на подложке при ионной бомбардировке осаждается больше, чем из изношенного, то структура облученной лазерным излучением поверхности несколько грубее, чешуйки крупнее (для сравнения рис. 6). Микротвердость облученной поверхности снижена.

Покрытия на образцы наносили по стандартной технологии при давлении азота, близкому к тем, которые рекомендуют для режущего инструмента [4]. Топография покрытия полностью повторяла топографию подложки, имела большое количество дефектов (рис. 7).

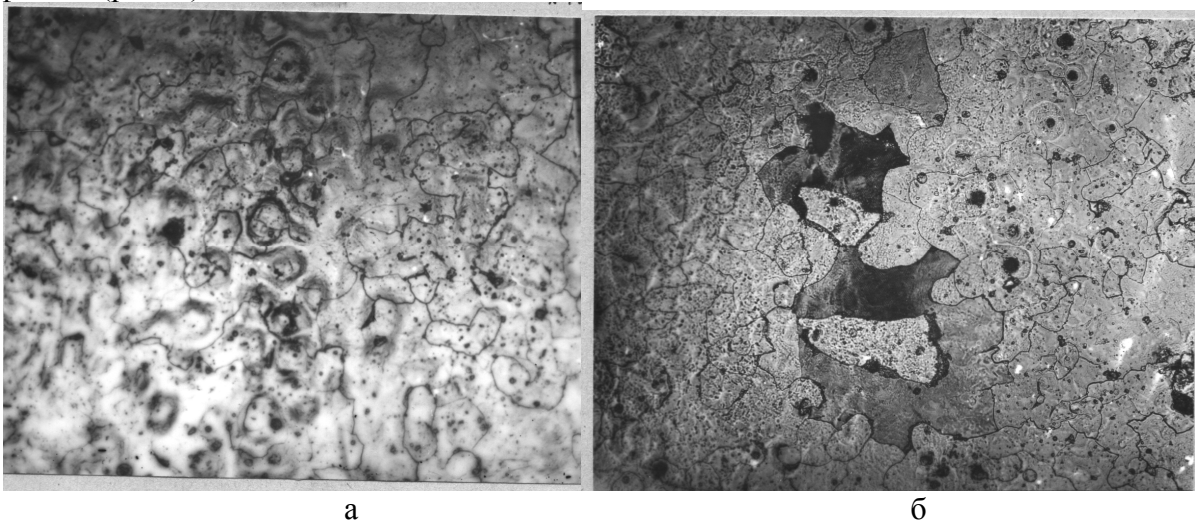


Рис. 7. Влияние повышения температуры подложки, обработанной ЛИ, на ее структуру при осаждении покрытия, увеличение в 400 раз: а – сталь P6M5K5,  $H_{100} = 2356$  МПа; б – сталь P6M5K5,  $H_{100} = 2700$  МПа, область с дефектным покрытием

Во всех случаях наблюдали снижение микротвердости покрытия, нанесенного на обработанные лазером участки подложки по сравнению с покрытием, нанесенным на чистую подложку. На покрытиях, нанесенных на участки образцов из стали 12ХН3А, не закаленных, и на участках, предварительно обработанных лазером, обнаружены многочисленные трещины. На рис. 8 (1) виден участок поверхности с зоной лазерной обработки (слева), покрытой трещинами, а в правой части рисунка видна достаточно регулярная структура покрытия, нанесенного на необработанную лазером поверхность. При увеличении в 2100 раз (рис. 8, 2) видна сетка трещин, которая образуется по центру хода

луча лазера. Трещины в покрытии TiN обнаружены и на образцах из стали 20, которую облучали лазером при  $\Delta f = -1,75$  мм. При большом увеличении хорошо видна развитая система трещин (рис. 8, 3).

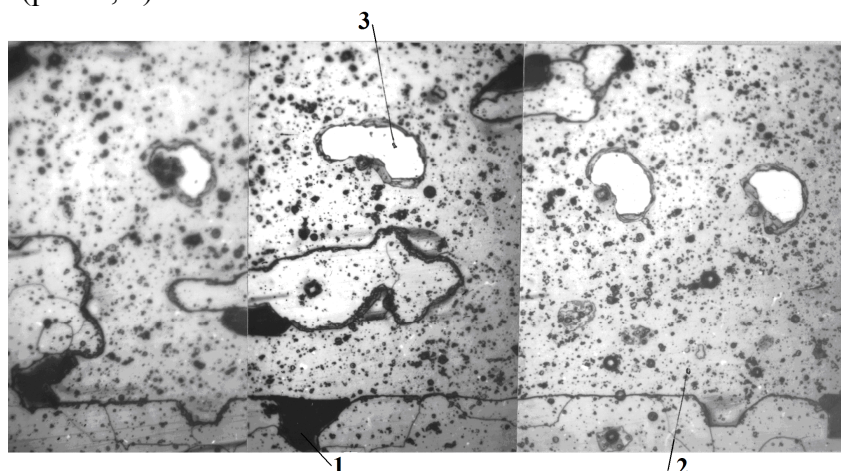


Рис. 8. Влияние повышения температуры подложки при осаждении покрытия на его структуру, сталь Р6М5К5,  $H_{100} = 9020$  МПа, увеличение в 2100 раз: 1 – область, характеризующаяся меньшим количеством капельной фазы и выдерживающая испытание на микротвердость; 2 – область с большим количеством капельной фазы, скол пленки при испытании на микротвердость; 3 – полный скол пленки до подложки

На рис. 9 последовательно представлены фотоснимки поверхностей образцов из стали 20, подвергнутые обработке лазерным лучом по покрытию при расфокусировке  $\Delta f = -1,75$  мм. Их можно интерпретировать как результат того, что при движении луча лазера не успевал переплавить всю пленку. Часть ее, находившаяся на периферии воздействия луча, оставалась в твердом состоянии, расплавленные края подтягивались к твердым, а наибольшая часть растрескивалась, покрывая обломками поверхность. Переплавленные области похожи на кристаллизацию эвтектики.

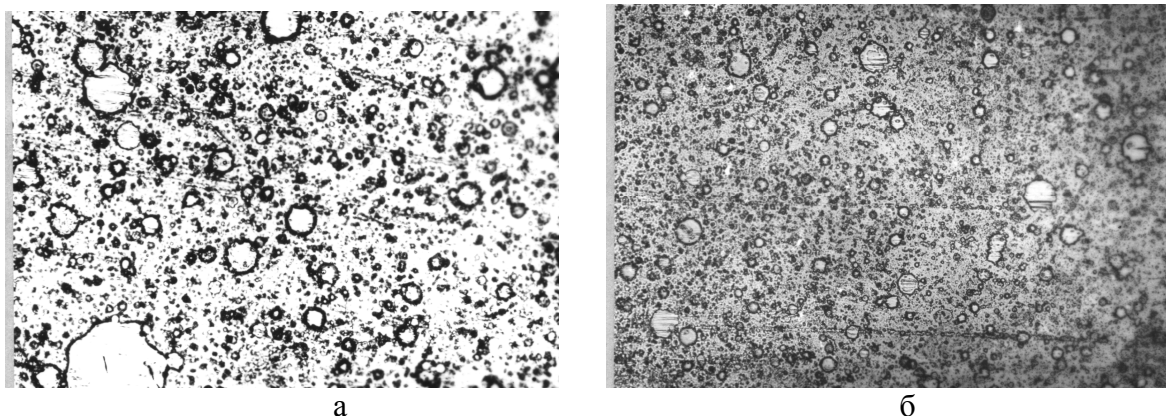


Рис. 9. Микроструктура покрытия из TiN, обработанного ЛИ, увеличение в 400 раз: а – сталь 12ХН3А,  $\Delta f = -2$  мм;  $H_{100} = 13220$  МПа, покрытие отполировано; б – сталь 12ХН3А,  $\Delta f = -2$  мм,  $H_{100} = 11939$  МПа, покрытие отполировано

Покрытие очень часто скалывалось под индентором при изменении микротвердости, рвалось при царапании на микротвердомере под нагрузкой 10...20 г. Поведение образцов с покрытием не менялось и через 2 месяца после нанесения покрытия и первичных испытаний.

Были проведены эксперименты по нанесению покрытий на образцы из стали 20 и Р6М5К5 и при более высоких температурах. Строение пленки нитрида титана в этом случае

резко отличается – оно растет послойно (рис. 8, 9). Линии, ограничивающие слой, образуют замкнутый контур и служат стоком для дефектов. Образцы из стали 20 вырезаны поперек направления прокатки, поэтому здесь нет преимущественного порядка в ориентации островковой пленки, в отличие от образцов из Р6М5К5, где видна преимущественная ориентация островков, вдоль направления прокатки. На электронноскопических снимках (рис. 8, а, б) хорошо видно, что тонкие извилистые линии – это не трещины, а контуры островков растущей слоями пленки, имеющих разную высоту.

Послойный механизм роста при одной и той же температуре сохраняется не только для полированной поверхности, но и для обработанной лазерным излучением (рис. 8, а). На таких поверхностях имеются участки синего, темно-синего, черного цвета, участки с рисунком типа муар, ограниченные ступеньками роста (рис. 8, б). Измерения микротвердости показали, что это отслоившиеся участки. После снятия нагрузки с индентора в поле зрения микроскопа было видно, что в районе отпечатка скачкообразно менялся цвет покрытия, часто происходил его скол. При царапании на микротвердомере критическая нагрузка колебалась в пределах 10-20 г. На указанных участках покрытие скалывалось, поверхности, имевшие меньшее количество дефектов, были прочнее по отношению к сколотым (рис. 8). Микротвердость покрытий, нанесенных при таких условиях, естественно низкая ( $H_{100} = 9020$  МПа).

При обработке лазерным излучением ранее напыленной пленки в диапазоне расфокусировок  $\Delta f = - (1,5 \dots 2,5)$  мм происходит диспергирование  $\alpha$ -фазы. Это хорошо видно на рис. 9, а, б, где образец после напыления и после обработки лазерным излучением дополнительно был отполирован для лучшего выявления  $\alpha$ -фазы. Микротвердость облученных участков ниже, чем у первоначальной поверхности с покрытием 13220 и 11939 МПа соответственно.

## ВЫВОДЫ

1. Для получения ощутимого эффекта упрочнения необходимо уменьшить по сравнению с примененным, длительность лазерного импульса до 50 нс, а плотность мощности повысить на 1–2 порядка.
2. Для сохранения исходной шероховатости при получении эффекта увеличения твердости нужно применить лазер миллисекундного диапазона с плотностью мощности, обеспечивающей закалку из твердого состояния.
3. С повышением температуры подложки появляется зона, где адгезия достаточна, но с дальнейшим ростом температуры пленки нитрида титана растет послойно и, хотя содержание  $\alpha$ -фазы снижается, но появляется отслаивание пленки.
4. Показана принципиальная возможность повышения стойкости режущего инструмента за счет лазерно-плазменно-ионной обработки.

Для оценки эксплуатационных характеристик РИ из быстрорежущей стали Р6М5 с покрытием TiN проводились стойкостные испытания РИ с покрытием и комбинированным упрочнением. Получено, что стойкость РИ с покрытием TiN и лазерно-плазменно-ионным упрочнением при точении стали 20 при скорости резания 117,5 м/мин  $S=0,61$  мм/об и  $t=0,8$  мин. Повышение стойкости при комбинированном упрочнении составило 2,51 раза по сравнению с покрытием TiN, что говорит о возможности образования наноструктур, которые при относительно не высокой микротвердости повышают ударную вязкость [8] и позволяют существенно повысить стойкость.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Костюк Г.И. Физико-технические основы напыления покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированной

технологии. Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий. Книга 1. Киев, Изд-во АИНУ, 2002. 587 с.

2. Костюк Г.И. Физико-технические основы напыления покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированной технологии. Справочник для расчета основных физических и технологических параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий. Книга 2. Киев, Изд-во АИНУ, 2002. 441 с.

3. Мацевитый В.М. Покрытия для режущих инструментов/ ХГУ издательство объединения «Высшая школа» Харьков, 1987. 128 с.

4. Костюк Г.И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем. Справочник, Киев, Изд-во АИНУ, 2003. 414 с.

5. Верещака А.С., Третьяков И.П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. / М.: Машиностроение, 1986. 190 с.

6. Костюк Г.И. Физико-технические основы роботизированного производства // Национальный аэрокосмический университет "ХАИ", Харьков, 2006. 614 с.

7. Kostyuk G.I. The effective cutting tools having the coating and hardened layers, Monograph–reference book. National aerospace university named by N.E. Gukovsky «Kharkov aviation institute». 2007. 633 p.

8. Костюк Г.И. Основы создания современных технологий. // Национальный аэрокосмический университет "ХАИ", Харьков, 2008. 551 с.

9. Приборы и методы физического металловедения // Под ред. Ф. Вейнберга. Пер. с англ. М.: Мир, 1973. Вып. 1. 427 с.

10. Влияние фазового контакта на износостойкость ионно-плазменных покрытий из нитрида титана. / Г.С. Фукс-Рабинович, А.А. Кацура, Ф.С. Моисеев, Г.К. Досбаева. // Трение и износостойкость. – 1989. – Т. 10, № 4. С. 742–744.