

COMPOSTOS UTILIZADOS COMO RECOBRIMENTOS PVD PARA MELHORIA DE QUALIDADE E DESEMPENHO EM MOLDES E MATRIZES¹

Danilo Celestino²
Rafael Agnelli Mesquita³

Resumo

Recobrimentos e tratamentos de superfície são amplamente utilizados para evitar o desgaste de várias peças, incluindo moldes e matrizes para conformação. O mais comum na indústria de metal duro, são os recobrimentos com base em arcos de pulverização catódica, que é um método utilizado para depositar uma fina camada de recobrimento com resistência ao desgaste composta por nitreto de titânio e alumínio (TiAlN). Os processos utilizados comumente para sintetizar o filme pretendido são o *chemical vapor deposition* (CVD) e o *physical vapor deposition* (PVD). Para o processo de recobrimento deve ser levado em consideração a compatibilidade mecânica e química do substrato a ser revestido, o substrato deve ter elevado grau de dureza e resistência para que não ocorra deformação durante o processo de recobrimento. Lembrando que para um recobrimento de qualidade, devemos ter uma boa adesão do recobrimento com o substrato, onde as propriedades do recobrimento serão transmitidas para o substrato, tornando-o mais resistente ao desgaste. Neste projeto são apresentados resultados de uma revisão atual sobre recobrimentos PVD para ferramentas.

Palavras-chave: Recobrimentos duros; Melhoria de qualidade; Desgaste; Desempenho.

PVD COATINGS COMPOUNDS USED AS TO THE QUALITY AND PERFORMANCE IMPROVEMENT IN MOULDS AND DIES

Abstract

Coatings and surface treatments are widely used to prevent wear of several parts, including molds and dies for conformation. The most common industry carbide coatings are based on sputtering arc, which is a method used to deposit a thin layer of wear resistant coating comprises titanium and aluminum nitride (TiAlN). The processes commonly used to synthesize the desired movie is the chemical vapor deposition (CVD) and physical vapor deposition (PVD). For the coating process should take into account the mechanical and chemical compatibility of the substrate to be coated, the substrate must have a high degree of hardness and resistance to deformation does not occur during the coating process. Remembering that for a coating of quality, we have a good adhesion of the coating to the substrate, where the properties of the coating will be transmitted to the substrate, making it more resistant to wear. In this project we present the results of a review of current PVD coatings for tools.

Key words: Hard coatings; Quality improvement; Wear performance.

¹ Contribuição técnica ao 11º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 14 e 15 de agosto de 2013, São Paulo, SP.

² Bacharel em Química. Mestrando em Eng. De Produção Universidade Nove de Julho, São Paulo, SP, Brasil.

³ Engenharia de Materiais. Doutor. Pesquisador. Universidade Nove de Julho, São Paulo, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Desde os anos 1960, revestimentos duros têm sido aplicados para reduzir o desgaste e melhorar sua qualidade, especialmente em, por exemplo, ferramentas de corte. Segundo Hitermann (1978), citado por Mesquita e Schuh,⁽¹⁾ devido à sua elevada dureza, um dos primeiros compostos utilizado em tais aplicações foi carboneto de titânio, o mesmo foi primeiro revestimento aplicado por CVD, embora a temperatura elevada deste processo tenha se revelado inadequada para substratos de muitos aços, restringindo a sua aplicação principalmente para ferramentas de metal duro, surgiu então uma nova tecnologia, a de PVD, que foi desenvolvida como uma forma eficaz de reduzir a temperatura de processamento para menos de 550°C, permitindo revestimentos em aços e demais ligas metálicas.

Apesar de diversos compostos serem possíveis, a indústria de ferramentas de conformação ainda utiliza poucos compostos em recobrimentos. Tipicamente, os recobrimentos a base de TiN ou TiAlN são os mais empregados. Por outro lado, recentes estudos mostraram propriedades superiores de compostos a base de carbonetos de nióbio, como por exemplo superior dureza e menor temperatura de degradação. No entanto, tais estudos foram conduzidos pela deposição direta, que não é prática na aplicação em ferramentas para a indústria de conformação. Sendo assim, o presente estudo estará focado no processo de deposição reativa, que pode ser aplicado para tais ferramentas e, assim, promover aplicação industrial, visando a melhoria de qualidade das ferramentas.⁽¹⁾

2 FILMES FINOS E OS PRINCIPAIS PROCESSOS PARA APLICAÇÃO EM FERRAMENTAS

Os aços aplicados em ferramentas de corte, moldes e matrizes são denominados genericamente por aços ferramenta e normalmente apresentam um arranjo complexo de elementos de liga, definido pelas diferentes solicitações em trabalho.⁽²⁾ Nas mais diversas operações, como ferramentas de forjamento, extrusão, corte e conformação a frio, ferramentas de usinagem e moldes para plástico, o principal mecanismo de fim de vida é associado ao desgaste ou à ocorrência de trincas.⁽³⁾

Neste contexto, os tratamentos de superfície tornam-se importantes. Exemplos mais importantes são o tradicional tratamento térmico de nitretação, empregado na maioria das ferramentas de conformação a quente, até os tratamentos a base de CVD (Chemical Vapor Deposition) ou PVD (Physical Vapor Deposition).⁽³⁾ Muito mais novos, os tratamentos de recobrimento via PVD vêm tornando-se cada vez mais populares no uso em ferramentas, pelos ganhos em desgaste mas também pela redução do coeficiente de atrito ou introdução de barreira térmica.⁽⁴⁾ Detalhes da aplicação de recobrimentos PVD em ferramentas são, portanto, mostrados nos próximos itens.

2.1 Processos CVD

Com base em Damasceno CVD é uma importante técnica para síntese de nanofilmes sendo possível realizar a deposição de metais, elementos não metálicos e uma ampla quantidade de compostos, tais como carbonetos, nitretos, óxidos, dentre outros. Esse processo é de suma importância para a indústria de semicondutores, componentes eletrônicos e de revestimentos. A formação de filmes, utilizadas por esse processo define-se pela deposição atômica, molecular, ou

combinação de ambos sob uma superfície aquecida de átomos ou moléculas que formam o filme e se encontram na fase de vapor. Os principais mecanismos de ativação das reações químicas são: aplicação de luz, calor, campos de radiofrequência, raios-X, arcos voltáicos dentre outros.⁽⁵⁾

Entre as principais vantagens da técnica estão:

- proporcionam altas taxas de deposição de filme;
- os equipamentos utilizados para CVD não requerem ultra-vácuo e são bastante versáteis; e
- há possibilidade na mudança de composição durante a deposição e a co-deposição de elementos ou compostos.

Entretanto, as principais desvantagens são:

- altas temperaturas são requeridas para manter o processo de forma eficiente;
- os gases reativos, e os produtos voláteis presentes nos processos são, na maioria dos casos, altamente tóxicos, explosivos ou corrosivos; e
- o controle da uniformidade dos filmes depositados na maioria das vezes é difícil.

Portanto a desvantagem relevante para revestimentos CVD é a necessidade de realizar o processo de recobrimento com temperaturas elevadas (750°C -1.000°C), o que limita por motivos termodinâmicos para a síntese de revestimentos metaestáveis,⁽⁶⁾ acarretando na redução da dureza do aço ferramenta, tornando necessário um novo procedimento de endurecimento por tempêra do material, processo o qual não interfere na estrutura do filme obtido pelo recobrimento.⁽⁷⁾

2.2 Processos PVD

Referente a essa técnica podemos compreender, com base em que os filmes são depositados em um substrato em unidades atômicas ou moleculares pelo processo da condensação e processos físicos como a evaporação, sublimação, átomos ou moléculas são transferidos da fonte para o substrato onde se depositam. Para a deposição PVD, existem vários métodos diferentes, os quais alguns serão citados a seguir.⁽⁵⁾

Para Mesquita, PVD é um processo onde o revestimento acontece num ambiente de vácuo, onde o filme é condensado a partir de uma interação de átomos de metais neutros ou ionizados. Atualmente há mais de uma técnica para o processo de PVD disponível para obter os recobrimentos em metais duros, a escolha do método utilizado depende do tipo evaporação de componentes metálicos e das condições do plasma aplicadas durante o processo de deposição.⁽¹⁾

Seguem alguns dos métodos mais utilizados.

2.2.1 Evaporação por meios térmicos

Processo que consiste na evaporação do material a partir de uma fonte de calor/energia, ocorre num ambiente a vácuo produzindo um fluxo de átomos condensando sobre o substrato formando assim o filme fino. Segundo Hutchins, citado por Schimitz, esse processo confere uma fraca adesão do filme, devido a uma interação entre os átomos do filme com os átomos do substrato que perdem energia rapidamente, existe também a possibilidade de contaminação por gases absorvidos no processo.⁽⁸⁾

2.2.2 Deposição a vácuo (*vacuum deposition*)

Neste processo a deposição ocorre devido à evaporação do alvo por meios térmicos (resistência, indução, arco, feixe de elétrons ou lasers) que se depositam sobre o substrato, para esse processo é necessário um ambiente com um vácuo com pressão variante de $1,3 \times 10^{-3}$ a $1,3 \times 10^{-8}$ Pa.⁽⁸⁾

2.2.3 Deposição iônica (*ion plating*)

Também conhecida como deposição auxiliada por íons, ocorre por bombardeamento simultâneo ou periódico de partículas energéticas, que geralmente é um gás inerte ou reativo, ou até mesmo íons do material do filme. O recobrimento ocorre com o alvo vaporizado por *Sputtering* ou erosão do arco. Isto ocorre num ambiente de plasma ou a vácuo.⁽⁸⁾

2.2.4 Deposição a vapor a arco

Técnica que utiliza a vaporização de um eletrodo na forma de arcos, onde o material do alvo é vaporizado e posteriormente depositado no substrato formando o filme. A formação de um arco acontece devido à alta corrente e baixa tensão, e uma corrente elétrica que passa através de gás ou vapor do material do eletrodo.⁽⁸⁾ A seguir uma breve descrição de diferentes tipos de arcos utilizados como técnicas PVD.

- arco a vácuo: neste processo ocorre uma baixa pressão de vácuo e elevada densidade de corrente e baixa tensão elétrica. O plasma necessário se origina devido à vaporização do material e à passagem da corrente entre os eletrodos separados no vácuo. Para que haja o vácuo é necessária uma pequena distância entre os eletrodos com uma densidade que pode variar de 10^4 e 10^6 A/cm². Esta densidade causa uma erosão no arco, devido à fusão e vaporização de partículas, enquanto no anodo a densidade de corrente é muito inferior, mesmo assim podendo ser suficientemente alta para derreter e evaporar o anodo, fazendo com que uma porcentagem do material vaporizado seja ionizada no arco e os íons multiplicados e carregados frequentemente. Com uma movimentação lenta dos íons com relação aos elétrons, uma carga positiva é gerada no espaço do plasma acelerando os íons positivos e afastando-os do plasma acompanhando o bombardeamento simultâneo por alta energia (filme íons);⁽⁸⁾
- arco anódico: segundo Sanders, citado por Schimitz, arco anódico é categorizado como fonte de elétrons, originando a partir de um aquecimento termo-eletron emitido pela superfície ou um cátodo quente. Para manter o material vaporizado na fonte de elétrons é necessário que se dobre o feixe de elétrons em um campo magnético; e⁽⁸⁾
- arco catódico: quando a vaporização ocorre na superfície do cátodo, chamamos o sistema de fonte contínua de arco catódico. Para deposição de filmes utilizamos a fonte de “cátodo frio” (refrigeração contínua do cátodo com água), para filmes de titânio utiliza-se uma corrente de 300-400 A para formação de um arco catódico estável.⁽⁸⁾

De acordo com Willians, citado por Bendavid, os metais de transição tendem a formar carbonetos e nitretos binários, os quais têm alto poder de fusão, boa condutividade elétrica e boas propriedades mecânicas como dureza e tenacidade, além de boa resistência a ataques químicos. Com estas características tornam-se excelentes revestimentos de materiais expostos a ambientes extremos.⁽⁹⁾

Segundo Kramer embora a capacidade de melhorar as propriedades de desgaste da superfície por meio revestimento pode permitir a fabricação de uma peça de

máquina a partir de um material menos dispendioso do que as condições de desgaste poderiam exigir, a presente economia exclui a aplicação de revestimentos tribológicos para a maioria dos produzidos em massa, porque geralmente os produzidos em massa possuem um custo bem menor se comparado àqueles revestidos, que possuem uma característica mais específica.⁽¹⁰⁾

2.3 Processos PVD por Sputtering

Para Schimitz, *sputtering* é uma técnica onde a geração da fase vapor se dá devido ao bombardeio do material no alvo por íons e átomos, ou seja, ao se chocar com o alvo (material pretendido para recobrimento) as partículas são extraídas e depositadas no substrato. Isso ocorre devido um potencial elétrico negativo aplicado no alvo e mantendo-o em baixas pressões, promovendo a formação de uma descarga incandescente ou plasma, e o consequente bombardeio do alvo por íons e átomos com energia. Além de sua facilidade de ionização de seus átomos, os gases nobres são usados devido a seu caráter reativo, como o argônio, por exemplo, e esse bombardeio arranca os átomos do alvo que se choca com o substrato. Os átomos gerados possuem uma energia muito maior em relação aos gerados por energias térmicas, acarretando em uma maior adesão e mistura com os átomos do substrato.⁽⁸⁾

2.3.1 Sputtering reativo

De acordo com Tentardini no *sputtering* reativo, filmes finos de compostos são depositados em substratos por *sputtering* em alvos metálicos na presença de um gás reativo, como por exemplo, o nitrogênio misturado ao gás inerte de trabalho, geralmente argônio, que se incorpora ao filme em quantidades que irão depender da razão entre as pressões parciais dos gases inerte e reativo e os parâmetros de deposição.⁽¹¹⁾

Afirma Tentardini também que a concentração do elemento reativo do filme será tanto maior quanto maior for a pressão parcial do gás reativo na câmara até o limite possível e a admissão de gases como N_2 e O_2 na câmara altera parâmetros como a taxa de *sputtering* no alvo, a taxa de deposição e a tensão entre alvo e o substrato.⁽¹¹⁾

2.3.2 Magnetron Sputtering

Podemos compreender com base em Ferreira, que *magnetron sputtering* é um processo modificado do processo de *sputtering* convencional, onde a principal diferença é que no *sputtering* a maioria do plasma está limitada a aproximadamente 60 mm na região próxima da superfície do cátodo que é seu alvo da descarga. O confinamento do plasma junto à superfície do cátodo surge como uma ajuda do campo magnético usando ímãs estáveis ou eletroímãs montados para originar na frente do cátodo um “caminho fechado”, das linhas de campo magnético.⁽¹²⁾

Contudo, Ferreira acrescenta que o objetivo do campo magnético é prender os elétrons secundários localizados nessa região, de um modo que os faça espiralar ao redor das linhas de campo, dando origem a um aumento na taxa de ionização do plasma, que acarreta em um maior bombardeamento do alvo e na quantidade de átomos expulsos do alvo por meio de *sputtering*.⁽¹²⁾ A combinação de Magnetron sputtering com reação gera o termo conhecido na literatura por magnetron sputtering reativo.

3 PRINCIPAIS RECOBRIMENTOS PVD

Os recobrimentos por PVD são aplicados em casos que envolvam desgaste em trabalho, como ocorrem em moldes e matrizes e também em ferramentas de corte e usinagem. Os primeiros recobrimentos por PVD utilizados na indústria foram à base de Ti e posteriormente foi acrescentado o Al para promover maior resistência à oxidação.^(13,14) A seguir falaremos sobre alguns dos recobrimentos mais utilizados industrialmente.

3.1 Monocamadas

3.1.1 Nitreto de titânio

Recobrimentos TiN realizados através da técnica PVD, vêm sendo amplamente utilizados desde 1980, com intuito de aumentar a resistência ao desgaste. Este tipo de recobrimento agregada significativa melhora a algumas propriedades mecânicas, tais como a capacidade de suporte de carga, dureza e resistência à oxidação.⁽¹⁵⁾

Como nitreto intersticial o mais utilizado é o TiN, pois possui características especiais, dureza, boa adesão em aços, alta estabilidade química e menor desgaste abrasivo, a Tabela 1 mostra um breve resumo das propriedades do TiN e a Figura 1, ilustra o recobrimento.

Tabela 1. Características e propriedades do nitreto de titânio

Propriedades e Características TiN	
Microdureza (HV 0,005)	2300
Coefficiente de atrito contra o aço (seco)	0,4
Tensões interna da camada (Gpa)	- 2,5
Temperatura máxima de trabalho (°C)	600
Temperatura do processo PVD (°C)	< 500
Estrutura do revestimento	Monocamada
Cor do revestimento	Ouro-amarelo

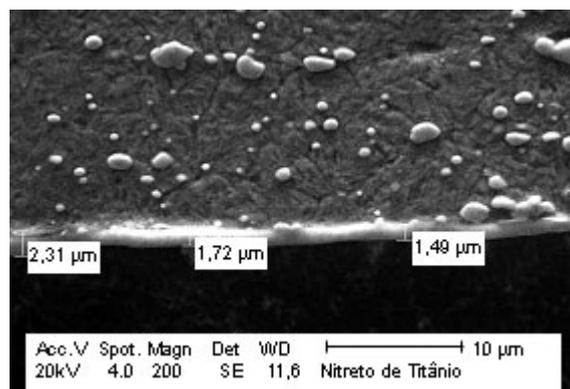


Figura 1. Micrografia da superfície com revestimento superficial de nitreto de titânio.⁽¹⁶⁾

3.1.2 Nitreto de titânio e alumínio

Apesar dos filmes a base de TiN ter uma maior abrangência em recobrimentos contra desgaste mecânico e corrosivo, ele é pouco eficiente quanto a oxidação, pois quando submetido a uma temperatura de trabalho superior a 600°C ele oxida rapidamente formando TiO₂. Isso ocorre devido a diferença em volume molar entre o TiO₂ e TiN, o que sucede em tensões compressivas na camada do óxido o que culmina na separação do filme com o substrato.^(17,18)

Um revestimento com propriedades mais adequadas para altas temperaturas seria o TiAlN, que ao comparado com o TiN, possui maior resistência a oxidação e forma uma densa camada de Al_2O_3 na parte mais externa do revestimento. Com isso o TiAlN tem sido muito utilizado na indústria, pela sua elevada dureza (28-32GPa), superior resistência a corrosão, alto ponto de fusão e boa estabilidade termodinâmica.^(17,19,20) A Tabela 2, mostra algumas características que o revestimento TiAlN confere ao material.

Tabela 2. Características e propriedades do nitreto de titânio alumínio

Propriedades e Características TiAlN	
Microdureza (HV 0,005)	3300
Coefficiente de atrito contra o aço (seco)	0,30 – 0,35
Tensões interna da camada (Gpa)	- 2,0
Temperatura máxima de trabalho (°C)	800
Temperatura do processo PVD (°C)	< 500
Cor do revestimento	Violeta-Cinzeno

O TiAlN assim como TiN possui uma estrutura cristalina de face centrada, substituindo o titânio pelo alumínio, a partir dessa substituição o parâmetro de rede diminui com um maior número de átomos de alumínio,⁽¹⁷⁾ com valor acima de 55% de alumínio, a estrutura cristalina do TiAlN sofre transformação para a fase hexagonal típica do AlN, modificando assim completamente as propriedades do material.^(17,19,20) Vários estudos vem sendo realizados afim de investigar em quais condições o TiAlN apresenta melhor propriedade com relação a corrosão e ao desgaste mecânico. Geralmente para trabalhos onde há desgaste mecânico excessivo utiliza-se o revestimento com maior quantidade de titânio, já quando se trabalha com temperatura elevada o mais utilizado é o revestimento com maior quantidade de alumínio.⁽¹⁸⁻²²⁾ A Figura 2, demonstra a formação do filme.

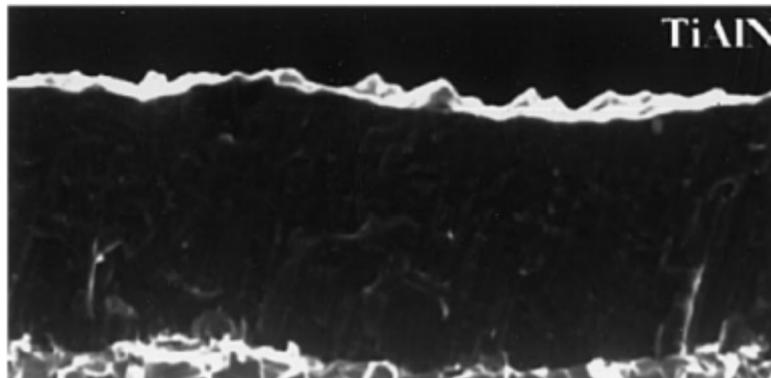


Figura 2. Micrografia, seção transversal do revestimento TiAlN.⁽¹⁶⁾

3.1.3 Nitreto de cromo

Além dos revestimentos citados anteriormente, foi verificado ao longo dos anos a possibilidade da utilização do CrN como revestimento duro, os resultados obtidos mostraram no entanto uma maior dificuldade de deposição quando comparado com revestimentos TiN e TiAlN, entretanto, foi comprovado excelentes propriedades de desgaste e corrosão, com dureza comparável à revestimento TiN, espessura mais suave e menos quebradiço. Utilizado para proteger substratos relativamente macios, por exemplo aço inoxidável, cobre, alumínio e aços não endurecidos. Este tipo de revestimento é empregado em alguns casos substituindo o TiN em processos de altas temperaturas. Este revestimento se caracteriza por sua estrutura de grãos

finos, o que permite uma maior espessura de deposição do que os revestimentos convencionais de PVD.⁽²³⁾

Como indicações para utilização de recobrimentos CrN, temos:

- usinagem de cobre;
- repuxamento semi-frio de aço e latão;
- fundição em moldes de metal;
- moldagem por injeção de plásticos (plásticos que possam liberar gases voláteis agressivos); e
- componentes em titânio em motores esportivos e na indústria aeronáutica.

Como dito, o recobrimento CrN confere boas características que protegem e agrega melhora quanto a produção, devido ao aumento de dureza conferida à ferramenta, a Tabela 3 e a Figura 3, evidenciam breve descrição do recobrimento CrN.

Tabela 3. Propriedades do revestimento CrN

Propriedades e Características CrN	
Microdureza (HV 0,005)	1.750
Coefficiente de atrito contra o aço (seco)	0,5
Tensões interna da camada (Gpa)	-1,5 / -2,0
Temperatura máxima de trabalho (°C)	700
Temperatura do processo PVD (°C)	200-450
Estrutura do revestimento	Monocamada
Cor do revestimento	Cinzento

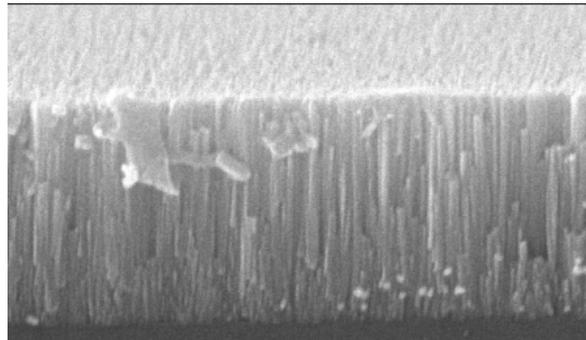


Figura 3. Formação da camada de CrN.⁽²³⁾

3.2 Multicamadas

Mesmo com a melhora apresentada pelos recobrimentos citados anteriormente como monocamadas em relação aos materiais que não possuem nenhum tipo de revestimento, há uma incessante busca por melhorias, para que haja materiais com propriedades cada vez mais específicas, assim, houve o surgimento de novos estudos, a partir daí surgiram os filmes de multicamada.

Filmes de multicamadas nada mais é do que filmes onde há deposição de dois ou mais materiais alternadamente um sobre o outro. Tais revestimentos apresentam melhora na inibição de propagação de trincas e melhora nas propriedades da superfície. Segundo PalDey na deposição multicamadas o revestimento tende a ser denso e de grão fino, pois o crescimento do grão colunar é interrompido pela nucleação da outra fase (camada), a presença de uma grande quantidade de área interfacial em estruturas de multicamadas pode aumentar a dureza e resistência ao desgaste.⁽¹⁹⁾ A Figura 4, mostra uma fotografia de um filme fino tipo multicamada.

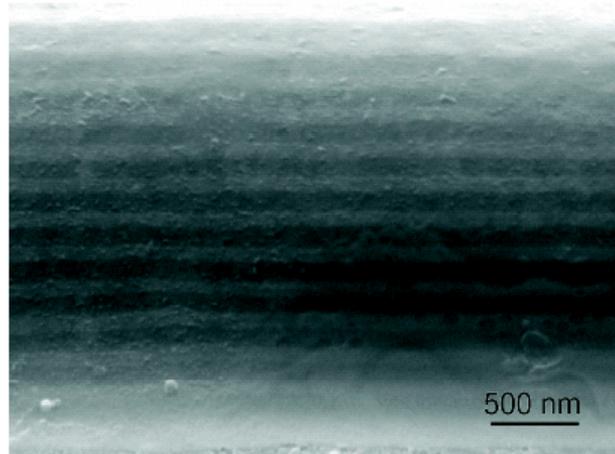


Figura 4. Micrografia transversal de uma multicamada TiN/(TiAl)N sobre aço inoxidável. A diferença nos tons é atribuída a diferença na composição.⁽¹⁹⁾

As multicamadas podem ser classificadas como isoestruturais e não-isoestruturais. Entretanto há também as multicamadas formadas por metais puros e nitretos, a seguir breve resumo de cada tipo de multicamada:

- isoestruturais, suas camadas individuais possuem a mesma estrutura cristalina, o que permite o deslizamento de linhas de discordância entre as interfaces das camadas. Geralmente para este tipo de multicamada é utilizado nitretos de metais de transição, como o TiN, VN, NbN, etc.;⁽²⁴⁾
- não-isoestruturais, suas camadas individuais possuem estrutura cristalina diferente, o que neste caso bloqueia o deslizamento das linhas de discordância entre as interfaces das camadas;⁽²⁴⁾
- multicamadas formadas por metais puros e nitretos, neste recobrimento, o metal possui a ductilidade e o nitreto elevada dureza, o que gera dificuldade no movimento das linhas de discordância, porque geralmente este tipo de recobrimento possui camadas de estruturas cristalinas diferentes.⁽²⁴⁾

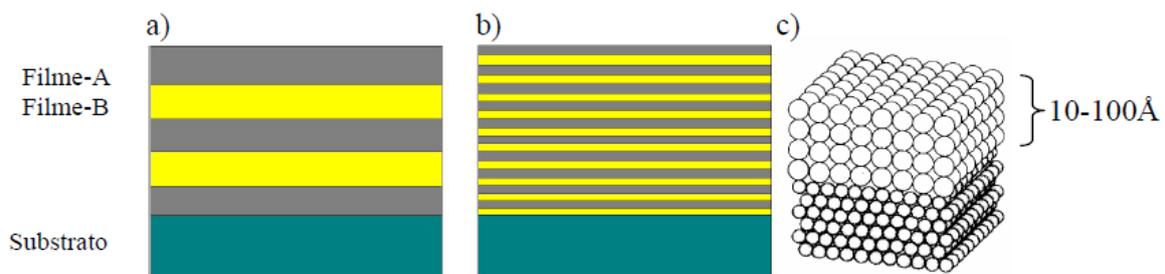


Figura 5. Classificação geral das multicoberturas.⁽²⁵⁾

3.3 Duplex

A técnica revestimento duplex surgiu por volta de 1990 e combina duas técnicas independentes: deposição de um revestimento duro e de tratamento de plasma de superfície. O desempenho e boa adesão do revestimento depende da boa interação do substrato e das propriedades do revestimento ^[26].

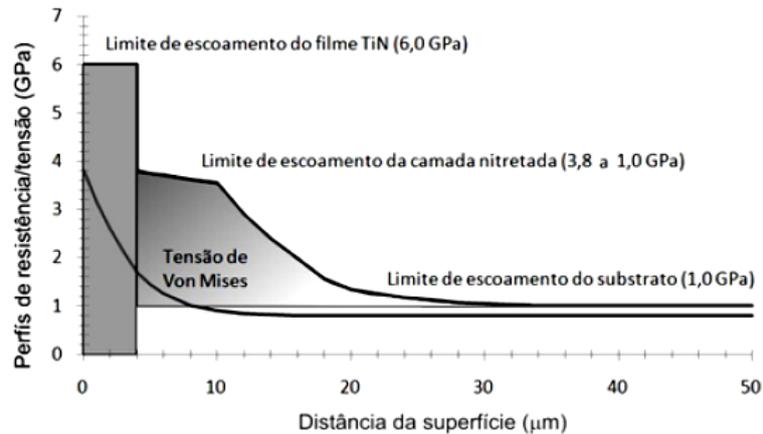


Figura 6. Representação esquemática da resistência mecânica em um aço ferramenta, após tratamento duplex: nitretação + PVD. Adaptado da ref ⁽²⁷⁾

Bastante utilizado comercialmente em aços ferramenta para fabricação de moldes de injeção de polímeros, matrizes de trabalho a frio e moldes de injeção de alumínio o tratamento duplex aumenta a capacidade de suportar o carregamento do substrato, devido ao tratamento de nitretação, onde este tratamento prévio resulta numa melhora adesão do par filme/substrato e melhora no desempenho tribológico.⁽²⁵⁾ A Tabela 4 mostra os ganhos em propriedades do substrato.

Tabela 4. Propriedades obtidas com o tratamento duplex de nitretação revestimento duro⁽²⁶⁾

Aço Ferramenta	Nitretação	Revestimento duro
Alta dureza	Alta dureza superficial:	Elevados valores de dureza
Resistência a abrasão	<ul style="list-style-type: none"> ○ Resistência a abrasão ○ Suporte para o filme cerâmico 	Alta resistência a fadiga térmica
	Tensões internas compressivas: <ul style="list-style-type: none"> ○ Resistência a fadiga de baixo ciclo 	Alta adesão

- Filmes com um número limitado de monocoberturas: Há a interrupção do crescimento colunar dos grãos e a combinação dos diferentes materiais.
- filmes com estruturas diferentes e com um número grande de monocoberturas: há aumento na quantidade de interfaces para dissipação de energia, a interrupção do crescimento colunar dos grãos e a combinação dos diferentes materiais com diferentes características funcionais são benefícios adicionais e importantes; e
- filmes com super-reticulados: para obtenção de camadas com super-reticulados são necessários materiais com mesma estrutura cristalina, mesmo tipo de ligação química, raios atômicos e parâmetros de rede semelhantes, nesta deposição as propriedades e o desempenho são superiores às das camadas individuais.

3.4 Nanocompósitos e Multifuncionais

A produção de revestimentos nanocompósitos têm dito crescente interesse de estudos, devido à possibilidade de síntese de materiais com propriedades únicas, essas as quais atribuem ao material super dureza, alta dureza e resistência combinada ou dureza e baixo coeficiente de atrito. Presume-se que vários mecanismos são responsáveis pela dureza e resistência do material, fatores potencialmente ligados a isso são:

- tamanho do grão em nanoescala;
- arranjo interfacial; e
- e a força de interface.

Apesar de desempenharem um papel importante para atribuir determinadas propriedades ao revestimento, é necessário uma interface bem definida e de alta força coesiva, para que não haja a propagação de trincas. Os estudos mais recentes sobre recobrimentos nanocompósitos até agora parecem ser sobre TiN-Si₃N₄, Ti-B-N, (estanho, TiB₂)-MoS₂, WC-DLC-WS₂, TiC-DLC, enquanto outros sistemas, por exemplo, ZrN-Cu, também estão sob investigação.⁽²⁸⁾ Geralmente as propriedades obtidas destes materiais não são completamente compreendidas, tal incompreensão não é atribuída apenas a partir dos mecanismos de micromecânica mal compreendidos, mas também devido ao fato de que apenas resoluções de técnicas analíticas para caracterização micro ou nanoestruturais não sejam suficientes.⁽²⁸⁾

4 CONCLUSÕES

Recobrimentos de filmes finos vêm atribuindo grande melhoria de produtividade, qualidade e longevidade de ferramentas num modo geral, para isso muitos estudos foram e ainda são realizados, com intuito de descobrir quais os melhores recobrimentos para determinadas aplicações. Durante esta revisão, foi visto que o recobrimento mais utilizado é o TiN e o TiAlN, pois atribuem às ferramentas, às moldes e matrizes ou até mesmo ao produto final características específicas, tais como maior resistência térmica, maior resistência ao desgaste e dureza elevada, propriedades que potencializam a qualidade do material.

REFERÊNCIAS

- 1 Mesquita A. R., Schuh A. C. Tool steel coatings based on niobium carbide and carbonitride compounds. *Surface & Coatings Technology* 207 (2012) 472–479.
- 2 G. Roberts, G. Krauss, R. Kennedy. *Tool Steels*, 5th ed., ASM International, Materials Park, OH, 1998, pp. 220-221.
- 3 L. C. F. Canale, R. A. Mesquita, G. E. Totten. *Failure Analysis of Heat Treated Steel Components*. ASM International, Materials Park, OH, 2008, pp. 311-355.
- 4 G. Roberts, G. Krauss, R. Kennedy. *Tool Steels*, 5th ed., ASM International, Materials Park, OH, 1998, pp. 305-323.
- 5 Damasceno, E. M. Deposição de AlN por Sputtering Não Reativo: 2010. 78f. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, Brasil.
- 6 C. Liu, H. Miao, L. Qi, Z. Peng. Hard and wear-resistant titanium nitride coatings for cemented carbide cutting tools by pulsed high energy density plasma, 2003.
- 7 W. Schintlmeister, W. Wallgram, J. Kanz, K. Gigl. *Cutting Tool Materials Coated By Chemical Vapour Deposition*.

- 8 Schimitz, C. Comportamento Tribológico de Filmes Duros Depositados por PAPVD em substrato de metal duro: 2006. 101f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil.
- 9 A. Bendavid, P. J. Martin, T. J. Kinder, E. W. Preston. The deposition of NbN and NbC thin films by filtered vacuum cathodic arc deposition. *Surface & Coatings Technology*. Vols 163–164, 2003, pp. 347–352.
- 10 B. M. Kramer. Requirements for wear-resistant coatings. Laboratory for Manufacturing and Productivity. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139 (U.S.A.).
- 11 Tentardini, E. K. Obtenção e Caracterização de Filmes Finos de (Ti,Al)N do tipo Multicamadas para Aplicação em Matrizes: 2004. 98f. Dissertação (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Rio Grande Do Sul, Brasil.
- 12 Ferreira, N. M. Adição de nanopartículas de Ti em matriz de Fe através da deposição por Magnetron Sputtering: 2011. 106f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais)-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil.
- 13 G. Håkansson, J.-E. Sundgren, D. McIntyre, J. E. Greene and W.-D. Münz. Microstructure and physical properties of polycrystalline metastable Ti_{0.5}Al_{0.5}N alloys grown by d.c. magnetron sputter deposition. *Thin Solid Films*, 1987, Vol. 153, No 1-3, pp. 55-65.
- 14 U. Wahlstöm, L. Hultman, J.-E. Sundgren, F. Adibi, I. Petrov and J. E. Greene. Crystal growth and microstructure of polycrystalline Ti_{1-x}Al_xN alloy films deposited by ultra-high-vacuum dual-target magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 1993, Vol. 235, No. 1, pp. 62-70.
- 15 M.B. Karamis, H. Sert. The role of PVD TiN coating in wear behaviour of aluminium extrusion die.
- 16 P.C. Jindal, A.T. Santhanam, U. Schleinkofer, A.F. Shuster. Performance of PVD TiN, TiCN, and TiAlN coated cemented carbide tools in turning. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 17 (1999) 16-170
- 17 Paldey, S.; Deevi, S.C. Properties of single layer and gradient (Ti,Al)N coatings, *Materials Science and Engineering A*. v.361, p.1-8, 2003.
- 18 Ohnuma, H. et al. Effects of aluminum concentration on friction and wear properties of titanium aluminum nitride films. *Surface and Coatings Technology*. v.177-178, p.623-626, 2003.
- 19 S. Paldey, S. C. Deevi. Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti,Al)N: a review. *Materials Science and Engineering A*, 2003, Vol. 342, No 1-2, pp. 58-79.
- 20 Shum, P.W. et al. Structural and mechanical properties of titanium aluminum nitride films deposited by reactive close-field unbalanced magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*. v.185, p.245-253, 2004.
- 21 Lee, D. et al. The structure and mechanical properties of multilayer TiN(Ti_{0.5}Al_{0.5})N coatings deposited by plasma enhanced chemical vapor deposition. *Surface and coatings technology*, v.169-170, p.433-437, 2003.
- 22 Manaila, R. et al. Multilayer TiAlN coatings with composition gradient. *Surface and Coatings Technology*, v.151-152, p.21-25, 2002.
- 23 B. Navinsek, P. Panjan, I. Milosev. Industrial applications of CrN (PVD) coatings, deposited at high and low temperatures. *Surface and Coatings Technology* 97 (1997) 182–191.
- 24 Yashar, P.C.; Sproul, W.D. Nanometer scale multilayered hard coatings. *Vacuum*, v.55, p.179-190, 1999.
- 25 Recco, A. Estudo da obtenção e das propriedades dos filmes de TiN e TiC depositados sobre aços ferramentas AISI H13 e D2 nitretados e não nitretados. 2008. 175f. Dissertação (Doutorado Engenharia Metalúrgica e Materiais) – Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, Brasil.
- 26 S. Rudenja, C. Leygrafa, J. Pan, P. Kulu, E. Talimetsc, V. Miklid. Duplex TiN coatings deposited by arc plating for increased corrosion resistance of stainless steel substrates. *Surface and Coatings Technology* 114 (1999) 129–136.

- 27 U. Huchel, S. Bramers, J. Crummenauer, S. Dresler, S. Kinkel. Single cycle, combination layers with plasma assistance. *Surface and Coatings Technology*, Nov. 1995, Vol. 76-77, part 1, pp. 211-217.
- 28 Mitterer, C. et. al. Microstructure and properties of nanocomposite Ti-B-N and Ti-B-C coatings. *Surface and Coatings Technology* 120-121 (1999) 405-411.