

МЕТОДЫ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ С ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Отсутствие специализированных приборов и оборудования для определения механических характеристик деталей с ионно-плазменными покрытиями потребовало разработки конструкции приборов и методик определения и расчета параметров с достаточно высокой точностью.

Одним из методов определения механических свойств покрытий является склерометрический, который позволяет характеризовать износостойкость и истинное сопротивление разрыву покрытий различного состава. Сконструирована и изготовлена установка для изучения некоторых механических свойств инструментальных материалов с покрытиями. Схема установки приведена на рисунке 1. Установка изготовлена на базе прибора ПМТ-3. Предметный столик (1) перемещается при помощи электродвигателя (2), обеспечивающего передвижение образца (3) со скоростью 0,32 мм/мин. Алмазный наконечник в виде четырехгранной пирамиды с квадратным основанием закрепляется в П-образный держатель (4), который установлен на коромысле 5 и имеет две степени свободы.

Сигнал от тензодатчиков поступает на тензометрический усилитель ТА-5, на показывающий прибор М-82 и регистрирующий осциллограф Н-700. Используемая динамическая аппаратура обладает высокой стабильностью и чувствительностью. Измерение параметров зоны деформации проводилось на микроинтерферометре МИИ-4.

Разработанная конструкция прибора позволяет измерять следующие параметры: величину вдавливающей силы – Р; величину горизонтальной тянущей силы – I; ширину зоны деформации – b мкм; глубину зоны – h мкм; про-

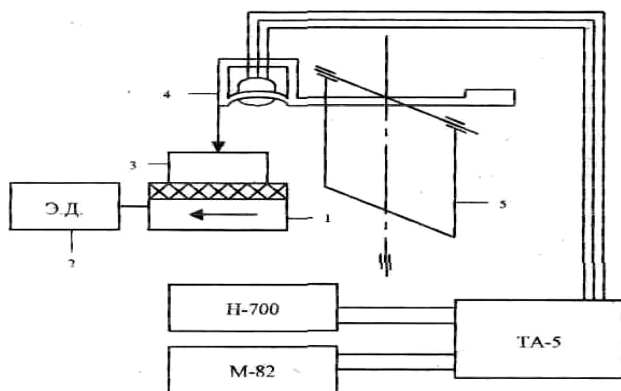


Рисунок 1. Схема склерометрической установки

филь зоны деформации по сечению; фотографирование и изучение полученных результатов.

Учитывая сложность работы инструментальных сталей при обработке металлов давлением в условиях, когда инструмент испытывает сложные температурные и динамические нагрузки, приводящие к возникновению сжимающе-растягивающих напряжений, абразивное воздействие, упругие и пластические деформации, необходимо определять соответствующие механические характеристики.

Поскольку ионно-плазменные покрытия на инструментальных сталях имеют толщину 8-10 мкм, изучение их механических свойств представляет значительные методические и практические трудности. Разработанный прибор и методика склерометрического анализа позволяют определять ряд важных механических характеристик. Склерометрия производилась ребром четырехгранной алмазной пирамиды с углом раскрытия зоны деформации при движении индентора $\phi_1 = 148^\circ 6'$.

Сопротивление деформации покрытий определялось как отношение горизонтальной тянущей силы J, перемещающей алмазный наконечник по образцу к площади поперечного сечения зоны деформации $F_{\text{сеч}}$, без учета упругих деформаций по формуле:

$$H_{\text{обр}} = \frac{J}{F_{\text{сеч}}} \quad (1)$$

Площадь сечения:

$$F_{\text{сеч}} = \frac{b^2}{4 \cdot \text{tg} \frac{\phi_1}{2}} \quad (2)$$

Отношение $\frac{J}{F_{\text{сеч}}}$ удовлетворяет закону механического подобия. Такой способ расчета позволяет учитывать факторы фрикционного взаимодействия индентора с материалом покрытия, а также затраты энергии на отделение частиц покрытий.

Значение величины упругого послепействия рассчитывалось по формуле:

$$f = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100\% \quad (3)$$

где h_0 – расчетная глубина, мкм; h_1 – экспериментальная глубина, мкм.

Расчетная глубина зоны деформации определяется по формуле:

$$h_0 = \frac{b_1}{2 \operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2}} = 0,286b_1 \quad (4)$$

После преобразований получено выражение, которое использовалось при определении величины упругого последствия:

$$f = \frac{0,286b_1 - h_1}{0,286b_1} \left(J - 0,496 \frac{h_1}{b_1} \right) \cdot 100\% \quad (5)$$

Одним из основных видов износа деформирующего инструмента при циклических нагрузках является абразивный, который можно представить следующим образом: твердые включения обрабатываемого материала, внедряясь в контактные поверхности плазменных покрытий на инструменте, царапают поверхность, действуя как микроскопические резцы.

Абразивный износ является процессом разрушения, поэтому оценка абразивной износостойкости проводилась с энергетической позиции, связанной с величиной работы, затраченной на удаление единицы объема плазменных покрытий. Экспериментальная величина T_i – горизонтальная составляющая силы деформации определялась на установке как тянущая сила, $F_{\text{сеч}}$ – сечение зоны деформации рассчитывалось по интерфонограмме. Значение J определялась по микрометру столика установки. Удельная энергия абразивного воздействия рассчитывалась по выражению:

$$E = \frac{T_i J}{F_{\text{сеч}} I} \quad (6)$$

Анализ приведенных результатов механических свойств покрытий разного состава и толщины показывает, что независимо от состава инструментальных сталей микротвердость, нитридных покрытий титана, циркония и молибдена имеет значительно более высокие значения

по сравнению с покрытиями из чистых тугоплавких металлов. Особенно эта зависимость характерна для двухслойных покрытий, при этом микротвердость практически не зависит от толщины покрытий, таблица 1.

Определенные рассмотренным способом механические характеристики покрытий, в частности абразивная износостойкость, не учитывают ряда факторов, действующих в реальных условиях работы деформирующего инструмента: скорость деформации; вид взаимодействующих материалов; микрогеометрия контактных поверхностей, но необходимую информацию о механических свойствах плазменных покрытий на инструментальных сталях разработанная методика дает с достаточно высокой степенью достоверности. Толщина покрытий определялась на бета-толщиметре «Microderm MP-700».

Значение T_i , характеризующие усилие перемещения индентора экспериментальной установки, значительно выше у покрытий на основе нитридов тугоплавких металлов по сравнению с однослойными покрытиями из чистых металлов. Величина упругого последствия, характеризующая время релаксации напряжений в покрытиях, значительно меньше в нитридных соединениях, так же, как и теоретические и экспериментальные значения глубины деформации. Из полученных экспериментальных результатов следует, что свойства покрытий повышаются от чистых тугоплавких металлов к их нитридным соединениям и более сложной двухслойной структуре покрытий.

Величина микротвердости, тянущая сила, упругие свойства материала покрытий и работа, затраченная на деформацию единицы объема, в значительной степени зависят от толщины покрытий. Анализ износостойкости покрытий на инструментальных сталях разного состава позволяет сделать заключение, что работа,

Таблица 1. Результаты склерометрических испытаний

Покрытие	Основа	Толщина покрытий, мкм	Микротвердость, 10^3 Мпа	Сила деформации, T_i н	Величина упругого последствия, %	Расчетная глубина деформации, h_0 мкм	Сечение зоны деформации, $F_{\text{сеч}}$ мкм	Экспериментальная глубина деформации, h_1 мкм
TiN	X12Ф1	8–9	24,2	0,42	88	2,0	14,0	1,24
Ti	XВГ	6–7	18,9	0,39	62	1,57	8,64	0,6
ZrN	X12Ф1	6–7	25,8	0,44	41	1,71	10,3	1,01
Mo ₂ N	XВГ	10–12	20,3	0,43	59	1,5	7,87	0,61
Ti	X12Ф1	12–14	8,24	0,26	14	8,61	45,7	3,1
TiN	4X5МФС	9–10	33,5	0,48	24	3,21	36,7	2,43
TiN	40X	4–5	7,32	0,26	39	2,82	27,9	1,72
TiN	4X5МФС	5–6	25,95	0,89	48	1,74	10,3	0,88
TiN	4X5МФС	7–8	25,8	0,82	28	3,02	32,4	2,96
Ti–TiN	XВГ	7–8	21,9	0,43	36	1,85	12,1	1,18
Zr–ZrN	XВГ	6–7	32,8	0,52	34	1,92	13,2	1,23
Mo–Mo ₂ N	XВГ	6–7	21,4	0,46	30	1,85	12,1	1,29

затраченная на деформацию единицы объема покрытий, тем больше, чем большую толщину имеет покрытие.

Стабилизация износостойкости всех изученных составов покрытий происходит при их толщине 8–10 мкм, при этом с усложнением состава покрытий стабилизация механических свойств наблюдается при меньшей толщине покрытий.

Характерно, что покрытие из нитрида титана толщиной 1 мкм не прерывается, а пластически деформируется под давлением индентора, что показано на рисунке 2-1. На этом же рисунке показаны следы деформации от индентора склерометрической установки покрытий разной толщины на инструментальной стали ХВГ, полученные на металлографическом микроскопе МИМ-10 при увеличении 620 крат.

Величина зоны деформации с увеличением толщины покрытий уменьшается, при этом покрытие из нитрида циркония оказывает большее сопротивление пластической деформации по сравнению с нитридом титана. Удельное давление при деформации алмазным индентором рассчитывалось по формуле:

$$P_{уд} = 4 \sqrt{\frac{3P_2}{F_{сеч}}}, \quad (7)$$

где: $P_{уд}$ – нагрузка на единицу площади покрытий, н/мм²; $P_2 = 2 \text{ н}$ – нагрузка на индентор; $F_{сеч}$ – площадь зоны деформации, мм², которая приведена в таблице 1. Расчет, проведенный по

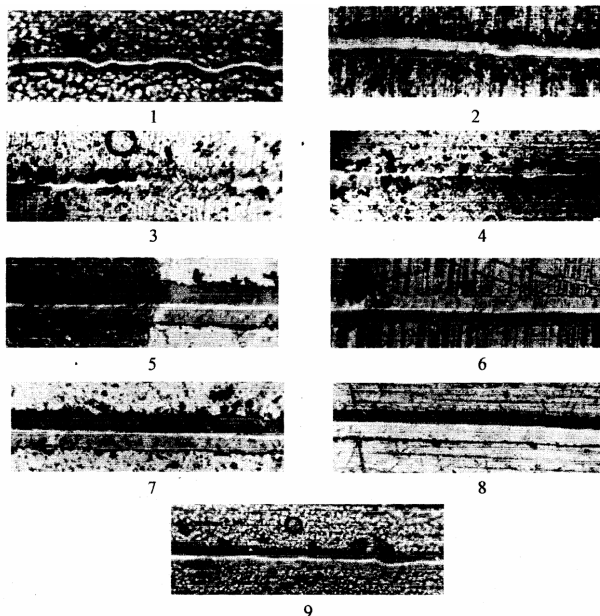


Рисунок 2. Зона деформации покрытий разной толщины: 1 – переходная зона от покрытия TiN толщиной 1 мкм к основе; 2 – сталь ХВГ без покрытия; 3 – покрытие TiN – 3 мкм; 4 – покрытие TiN – 5 мкм; 5 – покрытие TiN – 8 мкм; 6 – покрытие TiN – 10 мкм; 7 – покрытие ZrN – 2 мкм; 8 – покрытие ZrN – 4 мкм; 9 – покрытие ZrN – 6 мкм

выражению 7, дает значение удельного давления, равное $(2-8) \cdot 10^{-5}$ н/мм², что объясняет активную пластическую деформацию покрытий.

Покрытия всех изученных составов при толщине свыше 5–6 мкм значительно теряют свойства пластичности, а при толщине выше 10 мкм под действием приложенной нагрузки проходит активное диспергирование и растрескивание покрытий. Отмеченную особенность необходимо учитывать при разработке составов покрытий на рабочих частях штампов и пресс-форм.

Покрытие ближе к поверхности более склонно к пластическому деформированию, чем ниже лежащие слои. Эта особенность установлена применением малых нагрузок при деформации индентором – $2 \cdot 10^{-3}$ н.

Ширина зоны деформации в области малых нагрузок изменяется более интенсивно, чем при больших нагрузках. Это объясняется тем, что условия, необходимые для доведения поверхностных слоев покрытий до разрушения при различной глубине внедрения индентора, достигаются при разной степени деформации.

Поверхностные слои находятся в более благоприятных условиях для развития пластической деформации, чем нижележащие. Подтверждением отмеченной особенности служат данные по упругой восстанавливаемости материала покрытий, приведенные в таблице 1. Наиболее высокие упругие свойства имеют двухслойные покрытия Mo-Mo₂N, Ti-TiN, Zr-ZrN из-за мягких нижележащих слоев, которые упруго деформируются под действием алмазного индентора.

Наблюдается определенная закономерность между величиной $f\%$ – упругой восстанавливаемостью покрытий и удельной работой, которая служит критерием износостойкости, чем больше упругие свойства покрытий, тем больше требуется выполнить работы на отделение единичного объема покрытий от основного материала. Отмеченная особенность подтверждается результатами, приведенными на рисунке 3, и графиках зависимости величины упругого последствия от толщины покрытий (рисунок 4).

Проведена работа по изучению влияния толщины покрытий из нитридов тугоплавких металлов на подложку из стали ХВГ на разброс по горизонтальной составляющей силы деформации алмазным индентором склерометрической установки в зависимости от усилия вдавливания. На рисунке 5 показана сравнительная характеристика абразивной износостойкости покрытий из нитридов титана и циркония.

Разброс значений силы тяги, которая характеризует сопротивление деформации при увеличении вертикальной нагрузки на инденторе, тем больше, чем толще покрытие. Эта особен-

Таблица 2. Состав покрытий – абразивная износостойкость. 4Х5МФС

Состав покрытий	Абразивная износостойкость, $K \cdot 10^{-2} \text{ нм}^2$	Состав покрытий	Абразивная износостойкость, $K \cdot 10^{-2} \text{ нм}^2$
Без покрытия	10,4	Ti–TiN	5,4
Ti	9,8	Cr–CrN	5,8
Cr	10,0	Mo–Mo ₂ N	6,4
Mo	10,1	Zr–ZrN	4,6
Zr	9,6	Cr–TiN	4,2
TiN	6,9	Ti–ZrN	3,6
CrN	7,4	Mo–TiN–ZrN	2,1
Mo ₂ N	8,5	Cr–Zr–ZrN	1,8
ZrN	5,6	TiN–ZrN	1,6

ность связана с морфологией покрытий. Разные микроучастки покрытий имеют различную сопротивляемость износу, и требуются разные затраты энергии на их разрушение.

Такая неоднородность покрытий ухудшает их работоспособность. Поэтому при разработке технологии нанесения покрытий необходимо учитывать отмеченную особенность. Двухслойные покрытия имеют значительно меньший разброс значений при их деформации алмазной пирамидой. Изменение абразивной износостойкости при толщине покрытий 6–8 мкм стабилизируется и при дальнейшем увеличении толщины плазменных покрытий практически не меняется. Покрытия из нитрида циркония имеют более высокую износостойкость по сравнению с нитридом титана.

Сравнительный анализ абразивной износостойкости однослойных и многослойных покрытий показывает, что разрушение поверхности покрытий проходит по разному механизму. При вдавливании и одновременном перемещении индентора возникает пластическая деформация фазовых составляющих в покрытиях по механизму скольжения по межзерненным границам в результате деформации и переориентации кристаллитов, деформация распространяется по всей зоне действия деформирующего усилия. Для получения такой же степени деформации в случае покрытий сложного состава необходимо прикладывать значительно большие усилия. Систематизация полученных результатов приводится в таблице 2 при толщине ионно-плазменных покрытий 6–8 мкм, усилия при деформации один ньютон на инструментальной стали 4Х5МФС.

Из приведенных результатов следует, что изменяя составы покрытий, возможно получить однородные по структуре ионно-плазменные покрытия, с высокими характеристиками износостойкости. Наибольшие перспективы практического применения имеют многослойные и композиционные покрытия на основе тугоплавких металлов.

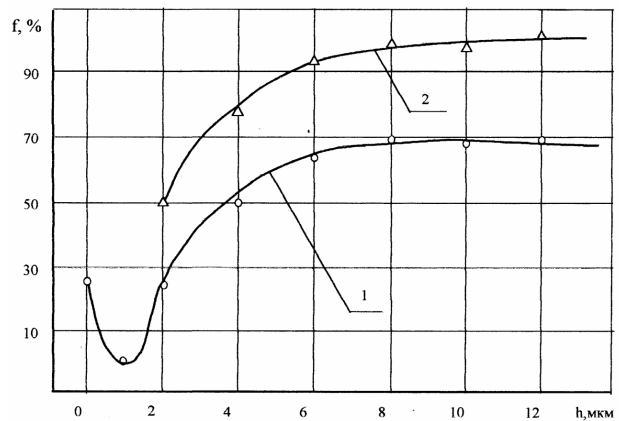


Рисунок 3. Зависимость упругого последствия покрытий от толщины 1 – нитрид титана, 2 – нитрид циркония. Сталь 30ХСНД

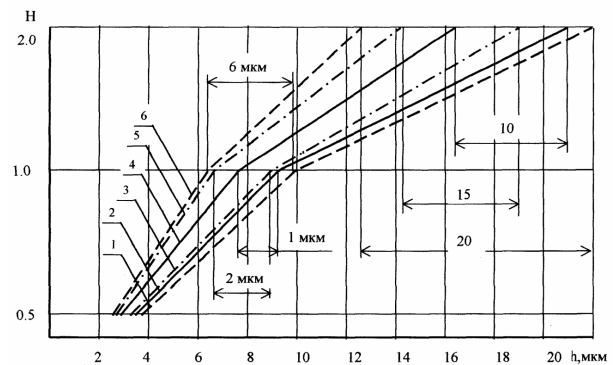


Рисунок 4. Глубина деформации покрытий в зависимости от вертикальной нагрузки и толщины покрытий: 1 – Mo₂N; 2 – CrN; 3 – TiN; 4 – ZrN; 5 – (Ti – TiN); 6 – (Zr – ZrN).

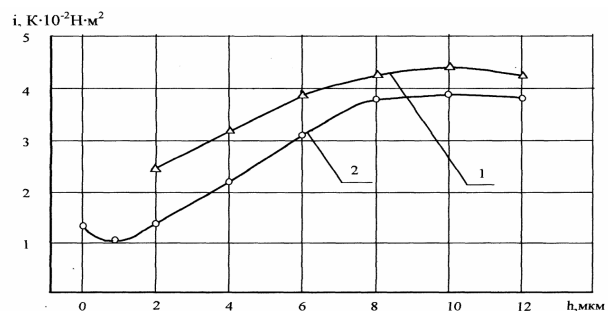


Рисунок 5. Зависимость абразивной износостойкости от толщины покрытий: 1 – TiN; 2 – ZrN.