

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ НАУКИ В ОБЛАСТИ УПРОЧНЕНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. А. Шматов¹, Любомир Шоош², Зденко Крайни²

¹ Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

² Словацкий технический университет, г. Братислава, Словакия

Дана оценка конструкционной прочности (КП) инструментальных материалов, которая включает критерии прочности, надежности, долговечности, качества и жесткости. Установлена взаимосвязь между основными критериями КП. Предложено многоуровневое построение композиционных структур для достижения синергизма прочности и надежности. Дан анализ механизмов и методов упрочнения материалов.

Ключевые слова: инструментальные материалы, упрочнение, композиционные структуры

DEVELOPMENT TRENDS OF SCIENCE IN THE AREA OF STRENGTHENING FOR TOOL MATERIALS

A. A. Shmatov¹, Lubomir Soos², Zdenko Krajny²

¹ Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

² Slovak Technical University, Bratislava, Slovakia

The structural strength (SS) of the tool materials, which includes the criteria of strength, reliability, durability, quality and inflexibility were estimated. The relationship between the main SS criteria was installed. To achieve the synergy of strength and reliability, the construction of multi-level composite structures was proposed. The mechanisms and methods of hardening for materials were analyzed.

Ключевые слова: tool materials, strengthening, composite structures

1. Оценка конструкционной прочности применительно к инструментальным материалам

Большинство русских ученых-материаловедов, таких как Лахтин Ю. М., Приходько В. М., Петрова Л. Г., Чудина О. В., Тушинский Л. И. и др. [1 – 7] рассматривают упрочнение, как способ «создания условий» для повышения конструкционной прочности (КП) сталей и сплавов. Под КП они понимают «комплекс механических свойств, обеспечивающих надежную и длительную работу» материалов (инструментов) в условиях их эксплуатации. Однако при этом не учитывается тот факт, что долговечность многих материалов определяется не только механическими, но и физико-химическими свойствами, особенно при адгезионном, диффузионном и окислительном изнашивании инструментов.

Савицкий Е. М. [9] рассматривает КП в более широком аспекте, как способность материала сопротивляться определенным внешним механическим, тепловым, химическим, и

другим воздействиям: «с одной стороны, прочность – это сопротивление пластической деформации, с другой, – сопротивление хрупкому разрушению, с третьей, – сопротивление изнашиванию, с четвертой – стойкость против коррозии, с пятой – способность выдерживать высокие температуры под нагрузкой» и т. д. Арзамасов Б. В. [10] также считает, что КП представляет собой совокупность не столько механических, сколько эксплуатационных свойств материалов. Согласно предложенной им классификации основными критериями КП являются надежность, долговечность, прочность и жесткость материала.

С учетом выше изложенных позиций КП можно рассматривать, как условное обозначение сопротивления материала внешним воздействиям, приводящим к снижению его работоспособности или разрушению, или как комплекс эксплуатационных характеристик, обеспечивающих работоспособность материала в течение длительной эксплуатации. В таком случае упрочнение материала – это

повышение КП в результате положительных изменений его химического состава, структуры и напряженного состояния, а упрочняющие технологии – это различные технологические, металлургические и другие процессы, которые обеспечивают материалу высокую КП в данных условиях эксплуатации. Когда говорят о КП инструмента учитывают еще его конструкцию (масштабный фактор), шероховатость поверхности и другие факторы.

Согласно предложенной классификации (рисунок 1) каждый критерий КП имеет собственные показатели, но нет одинакового подхода в характеристике критериев [1 – 10]. Обобщенный смысл основных критериев КП сводится к следующему: прочность – это способность материала сопротивляться пластической деформации; надежность – свойство материала (изделия) сопротивляться хрупкому разрушению и развитию микротрещин; долговечность – свойство материала (изделия) сохранять работоспособность до предельного состояния (до прекращения эксплуатации); жесткость – это способность материала (изделия) сопротивляться упругой и сдвиговой деформации.

Кроме того, без хорошего качества, как меры полезности [11], нельзя получить высокую КП материалов и инструментов. Качество обеспечивается металлургическими и другими производственными процессами [1 – 4, 6, 7, 10]. В материаловедческом аспекте улучшение качества сталей путем снижения в них количества вредных примесей и неоднородностей повышает КП, благодаря увеличению работы развития трещины КСТ, трещиностойкости K_{1c} , снижению анизотропии пластичности и вязкости. В технологическом аспекте качество зависит от шероховатости поверхности, точного соблюдения технологических процессов, чертежей и проявляется в 100 % повторяемости свойств и размеров всей партии инструментов и изделий, что также влияет на их работоспособность. В целом качество напрямую связано с основными структурно-зависимыми критериями КП такими, как прочность, надежность и долговечность, и только один структурно-независимый критерий, как жесткость, не зависит от качества. Качество – это совокупность не только свойств, но и иных показателей, которые отвечают техническим требованиям изделия и эти показатели гарантируют длительное сохранение его свойств. Поэтому качество можно рассматривать не как основной, а как дополнительный критерий КП наряду с другими выше перечисленными.

Главное назначение упрочняющей обработки состоит в целенаправленном улучшении работоспособности инструментов и изделий. Причем работоспособность данного инструмента определяет состояние, при котором в данный момент основные его рабочие параметры находятся в пределах, установленных требованиями технической документации [1 – 10]. При разных условиях эксплуатации инструмента такие требования меняются, т. е. технология обработки в отношении одних разрушающих воздействий может создавать сопротивление и носить упрочняющий эффект, а в отношении других – нет. Фридман Я. Б. [8] намеренно в названии КП уточняет характер преимущественного разрушения или выхода из строя материала и использует термины «усталостная конструкционная прочность», «хрупкая конструкционная прочность» и т. д. Из этих же соображений целесообразно указывать и вид преимущественного упрочнения материала: упрочнение против усталостного, хрупкого, коррозионного или других видов разрушений.

На основании анализа [1 – 11] в настоящей работе даны также рекомендации по выбору материалов для инструментов и их покрытий, чтобы увеличить уровень каждого из критериев КП (рисунок 1). Отмечена перспективность применения для инструментов нанокompозитов на базе сверхтвердых, тугоплавких материалов с высокой температурой плавления, а также композитов с дискретной и мозаично-дискретной структурами, в которых чередуются структурные элементы с взаимно противоположными свойствами и композитов с градиентной структурой, в которой плавно снижаются одни свойства и нарастают другие, противоположные им свойства [6, 10, 12 – 19].

2. Антагонизм основных критериев конструкционной прочности

Главная проблема повышения конструкционной прочности материалов состоит в том, что при их высокой прочности и твердости трудно обеспечить высокую надежность; существует антагонизм этих основных критериев.

Для сталей с различными механизмами упрочнения действует соотношение [3]:

$$K_{1c} \cdot \sigma_{0,2}^2 = const,$$

где K_{1c} – трещиностойкость (вязкость разрушения);

$\sigma_{0,2}$ – предел текучести.

Состояние и тенденции развития материалов, в которых конкурируют основные взаимно противоположные критерии КП, представлены на рисунке 2. Хорошее сочета-

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ НАУКИ В ОБЛАСТИ УПРОЧНЕНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

ние прочности и вязкости разрушения достигается в метастабильных аустенитных и мартенситно-старееющих сталях, в сталях со сверхмелким зерном и подвергнутых термо-

механической обработке (ТМО) и термоциклической обработке (ТЦО). Среди инструментальных материалов в этом плане лидируют твердые сплавы с покрытиями [1 – 10].

КРИТЕРИИ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИНСТРУМЕНТОВ				
Жесткость	Прочность	Надежность	Долговечность	Качество изготовления
Модуль упругости E , модуль сдвига G	Предел прочности при растяжении σ_B , предел текучести $\sigma_{0.2}$, предел прочности при изгибе $\sigma_{\text{из}}$, предел контактной выносливости σ_{-1} , твердость, определенная по отпечатку HV , H_{μ} , HRC , HV	Пластичность δ , Ψ , ударная вязкость КСТ, KCV , KCU , трещиностойкость (вязкость разрушения) K_{Ic} , порог хладноломкости t_{50} , живучесть, критическое раскрытие трещины, уровень и распределение макронапряжений (напряжений 1-го рода), др.	Усталостное изнашивание, циклическая долговечность, интенсивность изнашивания, скорость высоко- и низкотемпературной коррозии, скорость ползучести, др.	Наличие примесей и неоднородностей в структуре, отклонения от технологии и чертежей, стабильность размеров и свойств инструментов; точность обработки, шероховатость поверхности, др.
РЕКОМЕНДУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИНСТРУМЕНТОВ И ИХ ПОКРЫТИЙ				
Стали с высоким содержанием карбидов и других легирующих соединений; комплексные карбидные (твердые) сплавы, композиционные керамические и сверхтвердые материалы, кроме наноматериалов	Высоколегированные стали и твердые сплавы; комплексные керамические (карбидные) и сверхтвердые материалы; материалы со сверхмелким зерном. Монокристаллы, в т. ч. бездислокационные; Поликристаллы, высоко насыщенные дефектами кристаллической решетки	Пластически деформируемые, градиентные и композиционные материалы. Стали со сверхмелким зерном, очищенные от примесей, легированные Mo , Ni и др., низкоотпущенные, с меньшей твердостью. Нанокompозитная тугоплавкая керамика, которая эксплуатируется в пределах ее температурной устойчивости	Стали с высоким содержанием карбидов, других легирующих соединений, комплексные твердые (карбидные) сплавы, нанополкомпози-ты из тугоплавких и сверхтвердых материалов. Наноматериалы, стекла и ситаллы только для покрытий	Сверхчистые и бездефектные инструментальные материалы, не имеющие вредных примесей и неоднородностей (избыточные фазы, структурная полосчатость, ликвации, др.)

Рисунок 1 – Критерии конструкционной прочности и рекомендации по выбору инструментальных материалов

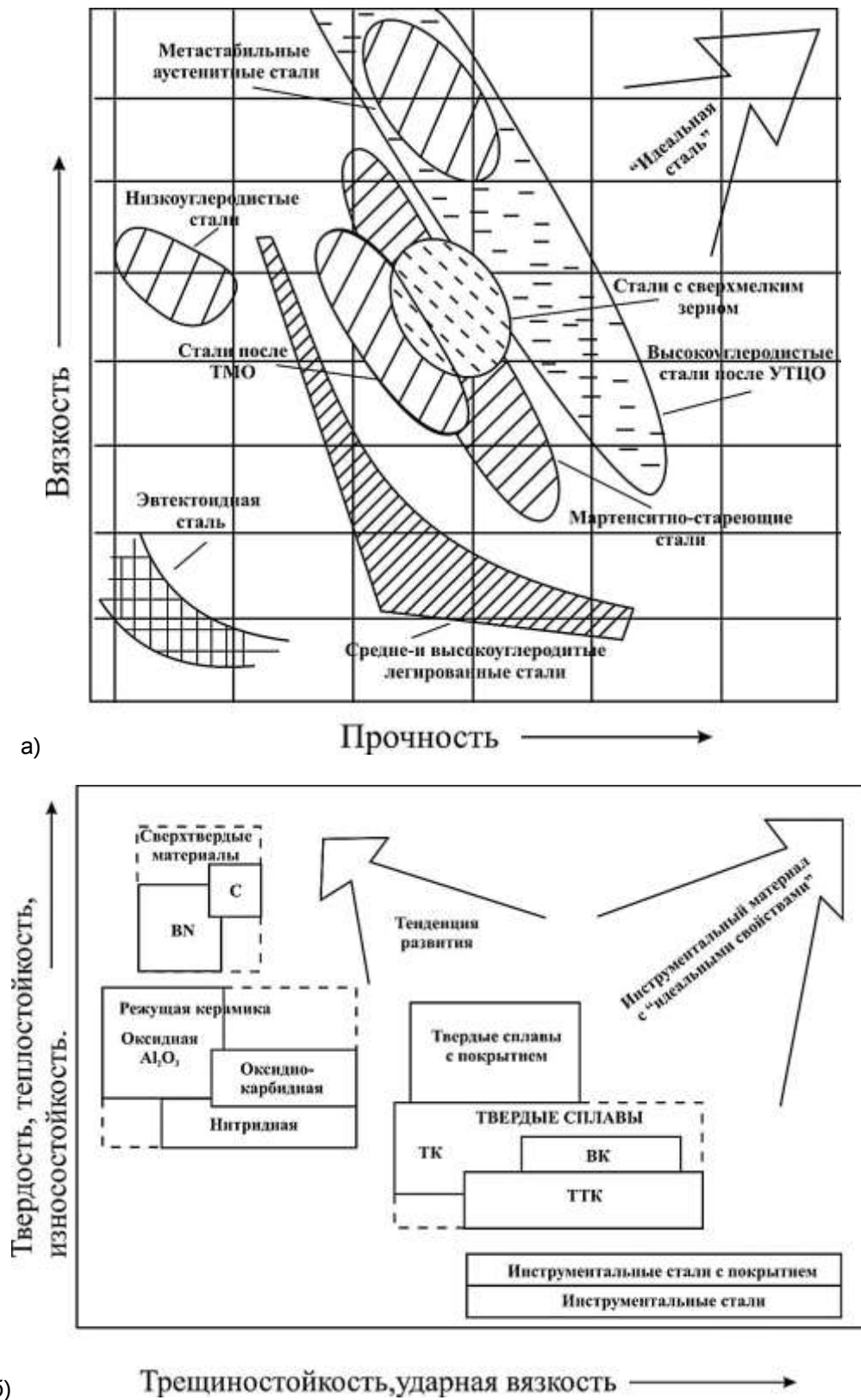


Рисунок 2 – Диаграммы антагонизма основных эксплуатационных свойств сталей (а) и инструментальных материалов (б)

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ НАУКИ В ОБЛАСТИ УПРОЧНЕНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Наибольшей надежностью в обычных условиях обладают металлические материалы, которые благодаря металлической связи способны пластически деформироваться и гасить развитие микротрещин; напротив неметаллические материалы в силу своей природы не обладают такой способностью и поэтому менее надежны.

Металлические сплавы в результате пластической деформации могут самоупрочняться; но такого нет у твердых сплавов и других сверхтвердых керамических материалов [1 – 4, 6, 7]. Однако существует температура ($T_{кр} = 0,7 - 0,9 T_{пл}$), выше которой тугоплавкие соединения (карбиды, нитриды, бориды, оксиды и др.) могут пластически деформироваться [9, 10]. Если при эксплуатации керамического инструмента, температура режущей кромки превысит температуру $T_{кр}$, это ведет к потере ее формоустойчивости и выходу из строя инструмента. Поэтому создают керамические инструменты на основе материалов с возможно высокой температурой плавления.

3. Синергизм критериев прочности и надежности

Существующий антагонизм критериев прочности и надежности значительно снижает КП. Приходится искать варианты оптимального сочетания этих противоположных характеристик с помощью новых технологий, материалов, пр., чтобы инструменты имели наибольшую работоспособность. Усиление эффективности или «синергизм» основных критериев КП материалов является важной технической задачей настоящего времени.

Имеются два подхода к решению этой проблемы:

(1) применение различных технологий изготовления химически и структурно однородного сплава, которые позволяют одновременно повысить его прочность и надежность;

(2) создание композиционного материала (КМ) с неоднородной структурой, рационально сочетающей противоположные свойства ее макро-, микро- и наноэлементов.

В первом случае это достигается измельчением зерен и субзерен, а также равномерным распределением дислокаций и частиц в объеме материала, когда реализуются механизмы упрочнения дислокационной теории прочности [1 – 4]. Во втором случае имеются два пути: первый – это традиционный способ создания КМ для изготовления инструментов и второй – это способ обработки инструментов с целью создания в них различных композиционных структур [1, 6, 7, 12 – 22].

Современное определение КМ [22] предполагает соблюдение следующих условий:

(а) композицию должны составлять хотя бы два разнородных материала (компонента) с четкой границей раздела между ними;

(б) компоненты образуют композицию своим объемным сочетанием;

(в) композиция должна обладать такими служебными свойствами, которых нет ни у одного из ее компонентов.

Помимо традиционного подхода, когда КМ создают отдельно от инструментов, существуют и не традиционные подходы, когда инструменты вместе с многослойными покрытиями и инструменты с дискретной или градиентной структурами, полученными в результате упрочняющей обработки, рассматриваются, как своеобразный КМ, каждый из которых имеет свою композиционную структуру (КС) [14 – 22]. Важной особенностью композиционной упрочняющей обработки материалов является то, что при создании КС не всегда соблюдаются все условия формирования КМ.

На основании анализа [14 – 22] в данной работе предложена классификация, которая позволяет проектировать различные структурные композиции с повышенной КП, в которых достигается синергизм ее основных критериев (рисунок 3). «Композиционно-структурное проектирование» инструментальных материалов предполагает рациональное составление макро макроэлементов (матрицы, слоя) и микро-, мезо- и наноэлементов (зерен, субзерен, частиц) в композиции, в которых комплексно сочетаются противоположные свойства ее элементов.

На рисунке 3 приведены только некоторые практически реализуемые варианты структурно-построенных композиций материалов. Общеизвестные варианты КС и КМ для изготовления изделий могут быть в равной мере использованы для инструментов.

Из сказанного следует, что будущее развитие за теми упрочняющими технологиями, которые смогут сформировать в самом инструменте и в его покрытии нанокристаллическую, нанокompозитную, градиентную, дискретную и мозаично-дискретную структуры.

4. Анализ механизмов упрочнения материалов и их реализация на практике

Современные представления об упрочнении материалов строятся на основе двух основных подходов: энергетического [23] и структурно-химического [1 – 10, 24 – 31] (рисунок 4).

Согласно теории Мартина Дж., Доэрти Р., Конобеевского С. Т. и др. о стабильности мик-

роструктур металлических систем, максимально улучшенными свойствами обладают материалы с метастабильными микроструктурами [23]. Сплав может иметь единственную стабильную и бесконечное множество нестабильных микроструктур. Поскольку сплав термодинамически нестабилен, структура может меняться со временем и температурой; в этом случае теряются все ее преимущества. Те микроструктуры, которые длительно выдерживают нестабильность в различных условиях, считаются высокометастабильными. При нагреве их термическая устойчивость определяется температурой начала превращений в менее желательные структуры. Нестабильность структуры может быть вызвана изменением химической свободной энергии, влиянием энергии деформации и поверхностей раздела, влиянием энергии электромагнитных источников и др. [23, 24].

В целом отмечены два пути формирования метастабильных микроструктур: (1) созданием избыточной свободной энергии материала и окружающей среды; (2) созданием избыточной свободной энергии внешней и внутренней поверхности раздела материала.

Движущей силой изменения микроструктуры является уменьшение свободной энергии атомов ΔF , но для перехода в стабильное состояние им требуется преодолеть энергетический барьер и затратить избыточную свободную энергию активации ΔF_A . Чем больше прирост этой энергии ΔF_A , тем более нестабильны атомы; они находятся в активированном состоянии. Свободная энергия системы и поверхности зависит от различных факторов: температуры, давления, химической концентрации и др. [1, 6, 7, 23, 24]. Поэтому чтобы получить избыточную свободную энергию ΔF_A создают наибольший градиент температур, напряжений, химических концентраций в материале и внешней среде. Причем эти процессы должны быть скоротечны.

На основании вышеуказанного анализа в работе предложена гипотеза, что прирост свободной энергии можно достичь также при быстрой циклической смене параметров процесса (температуры, напряжений, давления, химических концентраций, др.) даже с невысоким их градиентом. Например, высоко метастабильные структуры материалов можно сформировать при циклической смене твердофазных превращений материала [19] и многократной паро-жидкой трансформации (или кипении) внешней вододисперсной среды, содержащей ПАВ [16 – 18]. Повышение свободной энергии поверхности раздела (рису-

нок 4) можно еще достичь за счет поверхностного насыщения материала различными дефектами решетки (вакансиями, дислокациями, др.) и атомами легирующих элементов, а также созданием многофазной и сильно измельченной (нано-) структуры [23].

В основе структурного упрочнения металлических и керамических материалов с кристаллической структурой (рисунок 4) лежит дислокационная теория, согласно которой, упрочнение есть результат взаимодействия дислокаций с препятствиями различного порядка: дислокациями, элементами субструктуры, границами зерен, растворенными атомами, дисперсными частицами [1, 3]. Повышение прочностных характеристик создается путем торможения дислокаций комбинацией указанных препятствий, а увеличение надежности (вязкости разрушения, пластичности) – за счет огибания движущимися дислокациями регулярно расположенных дисперсных частиц при равномерном распределении дислокаций в металлическом объеме, а также за счет затруднения развития хрупкой микротрещины в сильно измельченных зернах и субзернах, границы которых постоянно меняют направление движения микротрещины.

Повышение прочности металлических материалов [3] достигается за счет трения кристаллической решетки силами Пайерлса-Набарро (σ_0) или уровнем структурных напряжений решетки ($\Delta\sigma_H$) [19], а также суммарным вкладом твердорастворного ($\Delta\sigma_{Т.Р.}$), дислокационного (деформационного) ($\Delta\sigma_d$), зернограницного ($\Delta\sigma_z$), субструктурного ($\Delta\sigma_c$) и дисперсионного ($\Delta\sigma_{дисп.}$) упрочнения.

В работах [1, 3] отмечено различное влияние на упрочнение железоуглеродистого сплава его структуры (перлита, феррита и мартенсита), тем не менее расчет зернограницного и субструктурного упрочнения ведется по размеру зерна или субзерна (таблица 1) на основании формулы Холла–Петча. Поскольку существуют различные формы структурных составляющих, например, у мартенсита: реечный и пакетный, у перлита: пластинчатый и зернистый, что определенно влияет на прочность сплава, предложено учитывать это упрочнение, как «формоструктурное» ($\Delta\sigma_{ФОРМ.}$), и которое в работе [2] обозначается, как «структурные особенности матричной фазы» [2]. Этот дополнительный механизм упрочнения можно оценивать размером пластин (d) мартенсита или перлита наряду с долей их распределения в матрице (f).

Согласно уравнению Орована [3] физический смысл упрочнения состоит в том, что

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ НАУКИ В ОБЛАСТИ УПРОЧНЕНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

прирост предела текучести $\Delta\sigma_T$, в сравнении с идеальным бездефектным поликристаллическим материалом, это сумма вкладов действующих механизмов упрочнения:

$$\Delta\sigma_T = \sum \Delta\sigma_i = \Delta\sigma_H + \Delta\sigma_{T.P.} + \Delta\sigma_D + \Delta\sigma_3 + \Delta\sigma_C + \Delta\sigma_{дисп.} + \Delta\sigma_{форм.}$$

С другой стороны, максимальной прочностью обладают идеальные монокристаллы и наноматериалы, имеющие минимальное количество дислокаций в кристаллической

решетке [1, 6, 17, 10], а увеличение надежности можно создавать путем чередования структурных зон с различной плотностью дислокаций, например, в нанокompозитах, где в бездислокационных нанозернах отсутствуют очаги образования микротрещин, а развитие трещин затрудняется при формировании несплошных покрытий и материалов с дискретной, мозаично-дискретной и наноструктурой [10, 14 – 19]. Все вышесказанное не противоречит теории дислокаций.

Таблица 1 – Структурные механизмы упрочнения стали (0,25 %C) по теории дислокаций [18]

Механизм упрочнения	Структура	Компоненты механизма упрочнения
За счет напряжений решетки $\Delta\sigma_H$	Феррит+перлит	Изменение параметров кристаллической решетки матрицы на основе: феррит+перлит, мартенсит, пр.
	Мартенсит	
Твердорастворный $\Delta\sigma_{T.P.}$	Мартенсит	Легирование феррита
	Мартенсит	Легирование мартенсита
Дислокационный $\Delta\sigma_D$	Феррит+перлит	Дислокации в феррите ($\rho = 10^7 - 10^8$)
	Мартенсит	Дислокации в мартенсите ($\rho = 10^{10} - 10^{12}$)
Зернограничный $\Delta\sigma_3$	Феррит+перлит	Размер зерен
	Мартенсит	Размер мартенситных пакетов, двойников
Субструктурный $\Delta\sigma_C$	Феррит+перлит	Размер субзерен
	Мартенсит	Размер субзерен в мартенситном пакете
Дисперсионный $\Delta\sigma_{дисп.}$	Феррит+перлит	Перлитная составляющая
	Мартенсит	Дисперсные карбиды в феррите и отпущенном мартенсите

Помимо механизмов дислокационной теории существуют другие структурные механизмы упрочнения инструментальных материалов, связанные с поверхностными процессами трения и коррозии. Согласно современным теориям трения и износа: молекулярно-механической, адгезионно-деформационной, молекулярно-атомистической, дислокационно-вакансионной и др., сопротивляемость изнашиванию можно повысить двумя путями: (1) снижением прочности адгезионной связи в узле трения; (2) увеличением твердости трущейся поверхности [25 – 29]. Первый путь достигается (рисунок 4) насыщением поверхности вакансиями (более 10 %), когда по теории Бернала любое твердое тело приобретает свойства жидкости; нанесением твердосмазочных покрытий из наноразмерных и слоистых материалов; введением в зону трения этих твердосмазочных компонентов, а также поверхностно-

активных веществ (ПАВ), которые снижают адсорбционную прочность твердого тела (эффект Ребиндера, правило Дерягина и др.) Второй путь достигается при формировании оксидной пленки определенного состава и структуры (эффект Роско) и другими способами повышения поверхностной твердости инструмента.

При трении следует учитывать температурный фактор, когда при определенной температуре: (1) скачкообразно возрастает скорость коррозии и идет диффузионное перераспределение элементов в матрице, приводящее к износу инструмента; (2) происходит деструкция смазочного материала, в результате чего теряются его антифрикционные свойства [26 – 28]. В этом случае (рисунок 4) инструментальные сплавы следует защищать и легировать коррозионно-стойкими металлами и соединениями, а также использовать другие меры защиты [30, 31].



Рисунок 3 – Синергизм критериев конструкционной прочности инструментальных материалов и инструментов

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ НАУКИ
В ОБЛАСТИ УПРОЧНЕНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ



Рисунок 4 – Классификация структурно-энергетических механизмов упрочнения инструментальных материалов

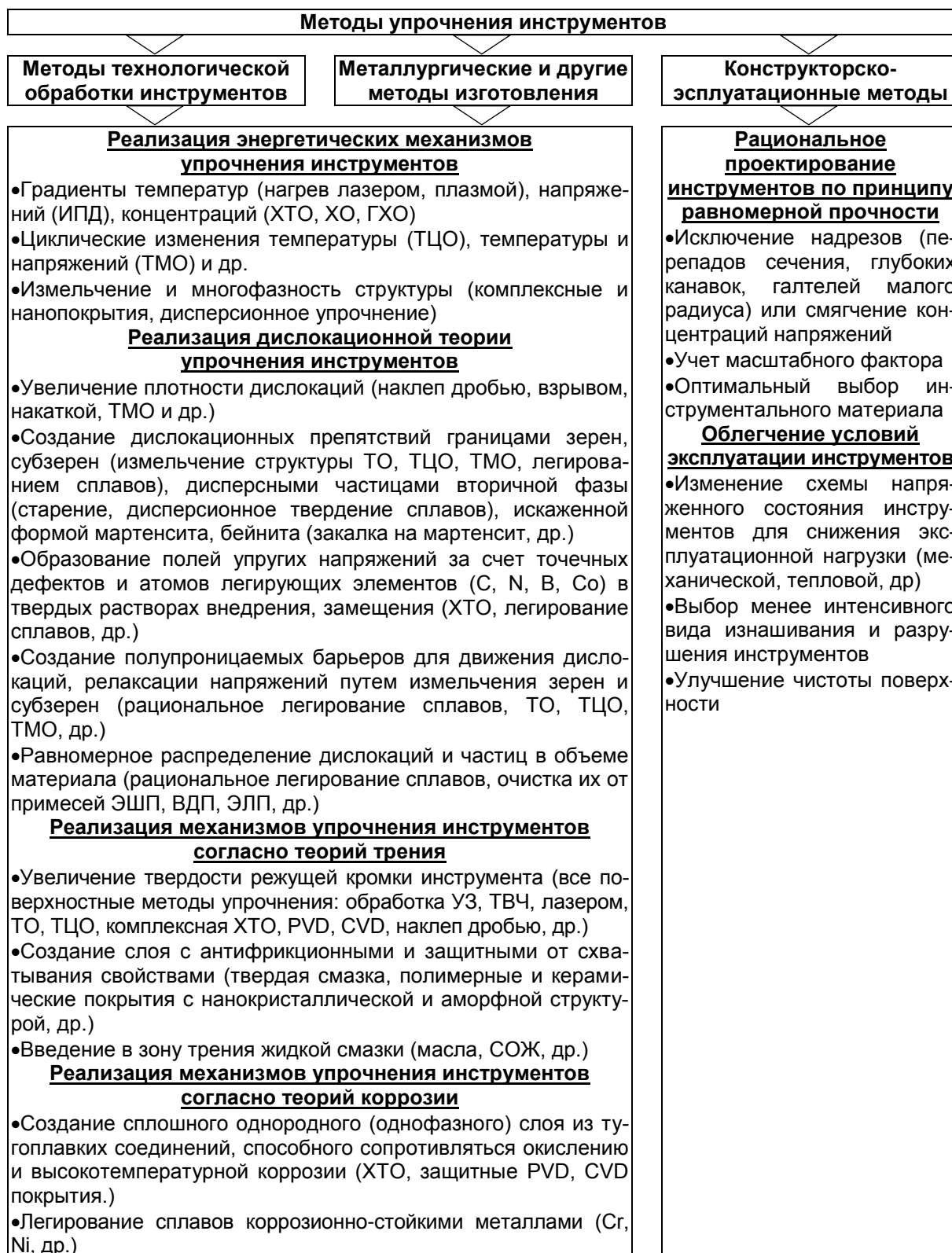


Рисунок 5 – Технологические и конструкторско-эксплуатационные методы упрочнения инструментов

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ НАУКИ В ОБЛАСТИ УПРОЧНЕНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Указанные выше механизмы упрочнения реализованы в технологических, металлургических и специальных методах изготовления и эксплуатации инструментов. На основании анализа [1 – 10, 14 – 21, 29] составлена классификация основных методов упрочнения инструментов (рисунок 5). Из нее видно, что использование конструкторско-эксплуатационных методов также позволяет повысить конструкционную прочность инструментов.

Выводы

1. Представлен современный взгляд на конструкционную прочность (КП) инструментальных материалов, которая состоит из критериев прочности, надежности, долговечности, жесткости и качества. Даны рекомендации по выбору материалов для инструментов и их покрытий, когда можно получить наилучшие показатели каждого из критериев КП.

2. Установлена взаимосвязь взаимно противоположных критериев КП: между прочностью и надежностью. Рассмотрена возможность их синергизма путем многоуровневого построения композиционных структур, в которых достигается максимальная КП инструментов и их материалов.

3. Проведен системный анализ механизмов и методов упрочнения инструментальных материалов, в основу которых положены два подхода: энергетическая теория метастабильности структур и структурно-химические теории дислокаций, трения и коррозии.

Список литературы

1. Лахтин, Ю. М. Материаловедение / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева; 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1990. - 528 с.
2. Петрова, Л. Г. Разработка технологий поверхностного упрочнения деталей машин и инструмента на основе научно-методологического комплекса инженерии поверхности металлических материалов. / Л. Г. Петрова // Упрочняющие технологии и покрытия, 2010. - № 12. - С. 28–39.
3. Приходько, В. М. Металлофизические основы упрочняющих технологий / В. М. Приходько, Л. Г. Петрова, О. В. Чудина. - М.: Машиностроение, 2003. - 384 с.
4. Чудина, О. В. Комбинированные методы поверхностного упрочнения сталей с применением лазерного нагрева. Теория и технология. - М.: МАДИ, 2003. - 248 с.
5. Тушинский, Л. И. Исследование структуры и физико-химических свойств покрытий / Л. И. Тушинский, А. В. Плохов. - Новосибирск: Наука, 1980. - 178 с.
6. Фетисов Г. П., Гарифуллин Ф. А. Материа-

ловедение и технология металлов. - М.: Изд-во Оникс, 2007. - 624 с.

7. Материаловедение. Технология конструкционных материалов / под ред. В. С. Чередниченко. - М.: Омега-Л, 2008. - 752 с.

8. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. - М.: Машиностроение, 1974. - Т.2 - 135 с.

9. Савицкий Е. М., Клячко В. С. Металлы космической эры. - М.: Металлургия, 1978. - 120 с.

10. Материаловедение: учебник для вузов / под общ. ред. Б. Н. Арзамасова. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. - 648 с.

11. Советский энциклопедический словарь / под общ. ред. А. М. Прохорова. М.: Сов. энциклопедия, 1984. 1600 с.

12. Суздаев И. П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. - М.: КомКнига, 2006. - 592 с.

13. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. - М.: Физматлит, 2009. - 416 с.

14. Антонюк, В. С. Выбор параметров покрытий с дискретной структурой при упрочнении поверхности режущего инструмента / В. С. Антонюк, Б. А. Ляшенко, Е. Б. Сорока // Упрочняющие технологии и покрытия, 2005. - № 3. - С. 21–27.

15. Лыгденов, Б. Д. Фазовые превращения в сталях с градиентными структурами, полученными химико-термической и химико-термоциклической обработкой: автореф. ... дис. канд. техн. наук: 01.04.07. Новокузнецк, 2004. 21 с.

16. Shmatov Alexander, Lubomir Soos, Zdenko Krajny. Thermo-Hydrochemical Treatment for Tool Materials (a monograph). Bratislava, Slovak Technical University, 2014, 109 pp. (in Slovak).

17. Шматов, А.А. Формирование композиционной структуры при термогидрохимической обработке стали / А.А. Шматов, Г.К. Жавнерко, Ю.О. Лисовская // Материаловедение. - 2013. - № 1. - С. 43–50.

18. Шматов, А.А. Формирование композиционной структуры при термогидрохимической обработке твердого сплава // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2013. - № 2. - С. 33–40.

19. Витязь, П.А. Упрочнение быстрорежущих и штамповых сталей методом термоциклической обработки / П.А. Витязь, А.А. Шматов, О.Г. Девойно // Докл. НАН Беларуси. - 2014. - Т. 58 - № 4. - С. 101–105.

20. Верещака, А.С. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями / А.С. Верещака, И.П. Третьяков. // М.: Машиностроение, 1986. - 192 с.

21. Щерба, В.Я. Новые композиционные материалы: учеб. - метод. комплекс. / В.Я. Щерба, А.Л. Лисовский // Новополюцк: ПГУ, 2009. - 220 с.

22. Справочник по композиционным материалам. Пер. с англ. / Под ред. Дж. Любина. // М.: Машиностроение, 1988. Vol. 1. 447 p., Vol. 2. 581 p.

23. Martin J.W., Doherty R.D. Stability of microstructure in metallic systems. London, New York, Melbourne: Cambridge University Press, 1978. - 280 p.
24. Воронков, Г.Я. Феномен поверхности – мир межфазной границы. / М.: Поколение, 2009. - 208 с.
25. Поляченко, О.Г. Физическая и коллоидная химия / О.Г. Поляченко, Л.Д. Поляченко // Могилев: Уо МГУП, 2008. - 196 с.
26. Мышкин, Н.К. Трение, смазка, износ / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец // М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. - 368 с.
27. Польшер, Г. Основы трения и изнашивания / Г. Польшер, Ф. Майсснер // М.: Машиностроение, 1984. - 264 с.
28. Гаркунов, Д. Н. Виды трения и износа. Эксплуатационные повреждения деталей машин / Д. Н. Гаркунов, П. И. Корник // М: Изд-во МСХА, 2003. - 344 с.
29. Витязь, П. А. Твердосмазочные покрытия в машиностроении - Минск: Бел. наука, 2007. - 170 с.
30. Жуков, А.Н. Основы металловедения и коррозии: учебник / А.Н. Жуков, А.И. Малахов // М.: Высш. школа, 1991. - 168 с.
31. Коррозия и защита от коррозии / Под ред. И.В. Семенов. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. - 336 С.
- Шматов Александр Анатольевич**¹ – к. т. н., с. н. с., доцент, ведущий научный сотрудник НИИЛ Акустики и специальных материалов
Шоош Любомир² – профессор, директор Института производственных систем, экологических технологий и управления качеством Машиностроительного факультета
Краини Зденко² – доцент Машиностроительного факультета
- ¹ Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
² Словацкий технический университет, г. Братислава, Словакия