

1

Einleitung

Dr. Ruben Schlutter

Der deutsche Werkzeugbau gehört zu den am höchsten entwickelten weltweit und gehört zu den Allstars der Werkzeugmärkte. Die weiteren Allstars sind China, die USA, Japan, Südkorea. Diese zeichnen sich durch eine hohe Werkzeugkompetenz und ein großes Produktionsvolumen aus. Der deutsche Werkzeugmarkt zeichnet sich dabei durch die höchste Werkzeugbaukompetenz und den fünftgrößten Markt aus. Damit ist der deutsche Werkzeugbau der wichtigste in Europa. Im Jahr 2020 hatte der deutsche Werkzeugmarkt ein Marktvolumen von ca. 1,84 Mrd € für Spritzgießwerkzeuge und ca. 400 Mio € für Druckgusswerkzeuge. Besonders hochpreisige und komplexe Werkzeuge werden in Deutschland gefertigt. [BLK+22]

Ebenso wie die Qualität der Spritzgießwerkzeuge immer weiter steigt, steigen auch die Anforderungen an die produzierten Kunststoffformteile. Neben den Anforderungen an das Design und die Oberfläche des Kunststoffformteils spielt auch die Fertigung eine wesentliche Rolle im Anforderungsprofil. Die Spritzgießwerkzeuge müssen dafür immer größeren Belastungen standhalten, sei es durch den Einsatz abrasiver oder korrosionsfördernder Kunststoffe, Füll- und Verstärkungsstoffe oder Additive oder auch durch technologische Forderungen, wie das Erreichen eines bestimmten Fließweges oder das optische Kaschieren einer Bindaht. Innerhalb des Spritzgießprozesses können dabei vielfältige Fehler an den Formteilen und den Werkzeugen auftreten, die durch den Einsatz von Beschichtungen in den Werkzeugen gelöst oder minimiert werden können.

Das vorliegende Fachbuch fasst den gegenwärtigen Stand der Wissenschaft und Technik im Bereich der Beschichtungstechnologie zusammen. Die Auswahl geeigneter Schichten ist dabei immer ein Zusammenspiel zwischen dem Werkzeugbauer, dem Fertiger der Kunststoffformteile, dem Abnehmer der Kunststoffformteile und dem Beschichter.

■ 1.1 Mögliche Fehler an Formteilen

Glanzunterschiede und Tigerlines

Der Glanz eines Formteils entsteht dadurch, dass auf das Formteil einfallendes Licht reflektiert wird. Je glatter und gleichmäßiger die Oberfläche des Formteils ist, desto gleichmäßiger wird das Licht reflektiert und desto kleiner ist der Streuwinkel des reflektierten Lichtes. Strukturierte Oberflächen im Werkzeug, aber auch eine unterschiedliche Abbildung der Formteilkavität durch den Kunststoff führen zu Unterschieden im Glanzgrad. Im Bereich von Kühlkanälen, Auswerfern oder Wanddickenunterschieden treten Glanzunterschiede häufig auf, da hier Unterschiede in der lokalen Werkzeugwandtemperatur bestehen, die zu einer anderen Abbildungsgenauigkeit der Werkzeugwand im Vergleich zur umliegenden Formteilkavität führen. Beschichtungen beeinflussen ebenfalls den Glanzgrad. Durch unterschiedliche Eigenschaften und Wirkungsweisen der Beschichtungen kann hier keine allgemeingültige Aussage getroffen werden. [KI21]

Ein Spezialfall beim Auftreten von Glanzunterschieden sind Tigerlines. Sie treten vor allem bei der Verwendung von Blends oder Mehrphasensystemen auf. Durch die unterschiedliche Abformung der Formteilkavität durch die jeweilige Phase entstehen alternierende Glanzeindrücke, die zu einer optischen Streifenbildung führen. Hauptursachen für die Bildung von Tigerlines sind das partielle Ankrystallisieren der Randschicht unter hohen Schubspannungen und Unterschiede in der Schmelzeelastizität. Auch die Änderung der Fließfrontgeschwindigkeit kann das Auftreten von Tigerlines begünstigen. [KI21]

Matte Stellen im Anschnittbereich

Im Anschnittbereich werden die Polymerketten der Schmelze stark gedehnt und orientiert. Da die Schmelze an der Werkzeugwand sofort einfriert, können diese Dehnungen und Orientierungen nicht durch Relaxation abgebaut werden. Die Bereiche hoher Orientierung weisen dabei schlechte mechanische Eigenschaften auf und sind sehr empfindlich gegenüber Rissen. Während die Schmelze unter der erstarrten Randschicht entlangfließt, reißt diese auf, sodass die Schmelze in die Risse strömen kann und wieder an der Werkzeugwand erstarrt. Es entstehen Mikrokerben, die zu einer stark gestreuten Lichtreflektion im Bereich des Anschnittes führen. [KI21]

Bindenähte

Wenn mehrere Fließfronten in der Kavität aufeinandertreffen, entsteht eine Binde-naht. Beim Zusammentreffen werden die Fließfronten abgeplattet, durchmischen sich teilweise und verkleben. An der Werkzeugwand entsteht eine Kerbe. Bei strukturierten Oberflächen können zusätzlich Glanzunterschiede auftreten. Diese stellen eine optische und mechanische Fehlstelle dar. [KI21]

Entformungsriefen

Entformungsriefen entstehen während des Ausstoßens des Formteils. Im Speziellen bei strukturierten Oberflächen und Formteilen mit großen Seitenflächen steigt die Entformungskraft stark an. Durch die Strukturierung oder die Oberflächenrauheit, die an den Seitenflächen quer zur Entformungsrichtung liegt, bilden sich mikroskopische Hinterschnitte, die zu Entformungsriefen führen können. [KI21]

Schallplatteneffekt

Schallplatteneffekte treten vor allem bei hochviskosen Kunststoffschmelzen in Verbindung mit einer niedrigen Einspritzgeschwindigkeit auf. Während des Einspritzens erstarrt die Randschicht hinter der Fließfront. Parallel kühlt der wandnahe Fließfrontbereich ebenfalls ab, wodurch der Quellstrom der Schmelze in Richtung der Werkzeugwand erschwert wird. Die nachströmende heiße Schmelze kann daher nicht bis zur Fließfront gefördert werden und sich an die Werkzeugwand anlegen. Stattdessen bewirkt sie eine Dehnung innerhalb des Strömungskanal. Wenn der Druck steigt, kommt die Fließfront wieder mit der Werkzeugwand in Berührung. Da diese Bereiche der Fließfront aber stark abgekühlt sind, kann sich kein vollständiger Kontakt mit der Werkzeugwand ausbilden. [KI21]

Raue Oberfläche durch Belagbildung

Belagbildung in der Werkzeugkavität kann vielfältige Ursachen haben. Zum einen neigen verschiedene Kunststoffe, wie unter anderem POM, PP, ABS, PC, PET und PBT, zu Bildung von Belegen. Darüber hinaus kann eine erhöhte Belagbildung bei der Verwendung von Flammschutzmitteln, UV-Absorbern und Farbstoffen oder Gleitmitteln beobachtet werden. Bei der Verwendung der Additive ist die Belagbildung häufig auf eine Mischungsunverträglichkeit zwischen dem Polymer und dem Additiv zurückzuführen. Teilweise begünstigt der Einsatz der Additive auch chemische Reaktionen innerhalb des Polymers oder einen oxidativen Abbau der Polymerketten. [KI21]

Zum anderen kann eine ungünstige Werkzeugauslegung oder Prozessführung die Belagbildung begünstigen. Vor allem bei einer langen Verweilzeit oder hohen Scherung der Kunststoffschmelze kann eine Belagbildung in der Werkzeugkavität auftreten. Eine schlechte Werkzeugentlüftung kann dazu führen, dass die Luft und die Ausgasungen aus der Kunststoffschmelze nicht aus der Formteilkavität entweichen können. Der Einsatz von Schmier- und Trennmitteln führt ebenfalls zu einer Belagbildung. [KI21]

Deformation beim Entformen

Während der Entformung werden Kräfte durch das Entformungssystem auf das Kunststoffformteil aufgebracht. Das Kunststoffformteil kann durch diese Entfor-

mungskraft deformiert werden, weshalb die Entformungskraft kleingehalten werden muss. Die Schwindung wirkt sich dabei direkt auf die Entformungskraft aus und kann durch den Prozess günstig beeinflusst werden. Parallel neigen verschiedene Kunststoffe dazu, auf metallischen Oberflächen zu haften, was zu einer deutlichen Erhöhung der Entformungskraft führt. Auch der Einsatz einer variothermen Prozessführung kann, im Speziellen bei teilkristallinen Kunststoffen, zu einer Erhöhung der Entformungskraft führen, da die Werkzeugkavität detaillierter abgeformt werden kann. [KI21]

Auswerferabdrücke und Weißbrüche

Neben den Glanzunterschieden im Bereich von Auswerfern können auch sichtbare Abdrücke durch die Auswerfer im Formteil entstehen. Diese können unterschiedliche Ursachen haben, wie eine falsche Einpassung der Auswerferlängen oder einen Fehler bei der Dimensionierung des Entformungssystems. Prozessseitig können hohe Entformungskräfte oder ein frühzeitiges Entformen, aber auch hohe Temperaturdifferenzen innerhalb des Werkzeugs oder zwischen Werkzeug und Auswerfer zu Auswerferabdrücken führen. [KI21]

Weißbrüche entstehen durch das Überschreiten einer maximal zulässigen materialabhängigen Verformung. Durch den Weißbruch werden die eingebrachten Spannungen abgebaut. Weißbrüche treten häufig bei der Entformung unter Restdruck oder im Bereich von Auswerfern auf. Dabei werden die äußeren Schichten des Formteils durch die inneren gedehnt. [KI21]

Unvollständig gefüllte Formteile

Bei einem unvollständig gefüllten Formteil wird die Kavität nicht vollständig gefüllt. Dafür kann es verschiedene Ursachen geben. Neben einem zu geringen Dosiervolumen und Entlüftungsschwierigkeiten ist häufig der Einspritzdruck nicht ausreichend oder die Fließweglänge zu hoch, sodass die Kunststoffschmelze einfriert, bevor sie das Ende des Fließweges erreicht. [KI21]

■ 1.2 Ableitung eines Lasten- und Pflichtenheftes

Im Umfeld der Produktentwicklung hat sich ein dreistufiger Entwicklungs- und Dokumentationsprozess, bestehend aus dem Lastenheft, dem Pflichtenheft und der Anforderungsliste, weitgehend durchgesetzt. Tabelle 1.1 beschreibt den Zweck, die Inhalte und die Abgrenzungen der Dokumente. [Con10, Ehr07, PBF+07]

Das Lastenheft wird zuerst vom Auftraggeber erstellt und beschreibt alle Anforderungen und Randbedingungen aus der Sicht des Auftraggebers. Es dient als Grundlage für die Ausschreibung und das Angebot.

Das Pflichtenheft wird vom Lieferanten erstellt. Es enthält das Pflichtenheft und beschreibt die Kundenvorgaben mit den entsprechenden Anforderungen und wie diese bearbeitet und gelöst werden sollen.

Die Anforderungsliste enthält eine systematische Zusammenstellung aller Daten und Informationen. Sie wird durch den Entwickler erstellt und wird zur exakten Klärung der Aufgabe genutzt. Nach der Genehmigung durch den Auftraggeber sind das Pflichtenheft und die Anforderungsliste bindende Dokumente. [Con10, Ehr07, PBF+07]

Tabelle 1.1 Die verschiedenen Dokumente zur Aufgabenklärung [Con08]

	Lastenheft	Pflichtenheft	Anforderungsliste
Definition	Die Anforderungen des Kunden werden als Liefer- und Leistungsumfang zusammengestellt.	Die Realisierung aller Anforderungen wird durch den Lieferanten beschrieben.	Die Zusammenstellung der Daten und Informationen durch den Entwickler für die Produktentwicklung.
Ersteller	Kunde	Lieferant	Konstrukteur/ Entwickler
Aufgabe	Definition, was und wofür zu lösen ist.	Definition, wie und womit Anforderungen realisiert werden.	Definition von Zweck und Eigenschaften der Anforderungen.
Bemerkung	Das Lastenheft enthält alle Anforderungen und Randbedingungen.	Das Pflichtenheft enthält das Lastenheft mit den Realisierungen der Anforderungen.	Die Anforderungsliste entspricht einem erweiterten Pflichtenheft.

Dieses Vorgehen lässt sich auch auf die Entwicklung von Beschichtungen übertragen, wobei die Fragestellungen aus den unterschiedlichen notwendigen Einzeldisziplinen (u. a. das später zu fertigende Formteil, das zu beschichtende Bauteil, der spätere Fertigungsprozess) definiert und beantwortet werden müssen. Daraus ergibt sich die prinzipielle Gliederung des Lasten- und Pflichtenheftes zur Auswahl und Entwicklung eines geeigneten Beschichtungsprozesses:

- Anforderungen an das Formteil
 - Bauteilgeometrie
 - Bauteiloberfläche und relevante Oberflächen
 - verwendeter Kunststoff

- Anforderungen an das Werkzeug
 - zu beschichtender Werkzeugwerkstoff
 - zu beschichtende Oberfläche (Rauheit, Narbung, ...)
 - infrage kommende Beschichtungstechnologien
 - prinzipielle Entwicklung der Schicht
- Anforderungen an die Funktionalität der Schicht
 - angestrebte Spritzgießparameter
 - Methoden zur Werkzeugreinigung
 - systemspezifische Vorgaben und Restriktionen
- Funktionsprüfungen
 - Mess- und Charakterisierungsverfahren
 - Versuche zur Prüfung der Schichtqualität und Schichthaftung
 - Anwendung im Produktionswerkzeug
 - Effizienzuntersuchungen

Aus dieser prinzipiellen Gliederung entwickelt sich die Methodik zur Entwicklung der Beschichtungen nach Bild 1.1. Dabei werden zuerst mögliche Abscheidungsprozesse simuliert, um das Prozessfenster und die Lage des zu beschichtenden Bauteils im Reaktor für die spätere Beschichtung abschätzen zu können. Im zweiten Schritt erfolgt dann die eigentliche Beschichtung. Neben dem zu beschichtenden Bauteil werden dabei immer auch Metallmünzen an verschiedenen Stellen im Reaktor positioniert. An diesen Münzen werden die nachfolgenden Untersuchungen durchgeführt, um das Bauteil nicht zu beschädigen. Hier wird die Schichtdicke untersucht. Auch der Aufbau mehrlageriger Schichten, das Vorhandensein von Beschichtungsfehlern, die Haftung der Beschichtung auf dem Substrat oder die Härte der Schicht können an dieser Stelle untersucht werden. Eine Bewertung der Schichtoberfläche ist ebenfalls möglich. Je nach Zweck der applizierten Beschichtung werden weitere Untersuchungen durchgeführt, um die Eigenschaften der Beschichtung zu untersuchen und ihre Eignung in Hinblick auf die im Pflichtenheft und der Anforderungsliste definierten Anforderungen sicherzustellen. Die praktische Eignung der Beschichtung muss dann aber immer im realen Anwendungsfall erfolgen. Dabei werden die Beschichtungen im Neuzustand untersucht und nach der Anwendung der Beschichtung erneut, um ein Abtragen oder eine Beschädigung der Beschichtung charakterisieren zu können.

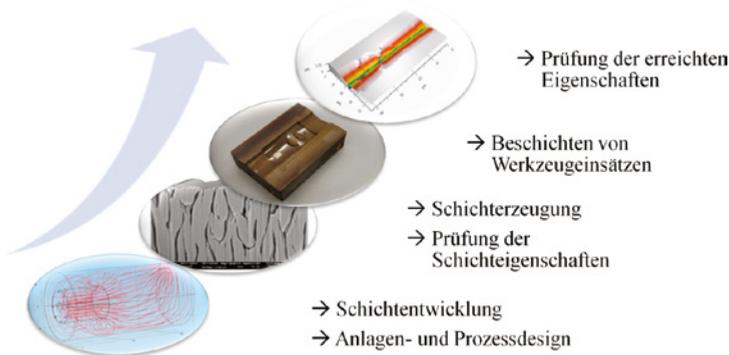


Bild 1.1 Vorgehensweise bei der Entwicklung von Beschichtungen (Bildquelle: KIMW-F)

■ 1.3 Literatur

- [BLK+22] BOOS, W.; LUKAS, G.; KESSLER, N.; ET AL.: *World of Tooling 2022*. Studie der WBA Werkzeugbauakademie Aachen, 2022
- [Con10] CONRAD, K.: *Grundlagen der Konstruktionslehre*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2010, 5. Auflage
- [Ehr07] EHRENSPIEL, K.: *Integrierte Produktentwicklung*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2007, 3. Auflage
- [KI21] N. N.: *Ratgeber Formteilfehler Thermoplast*. Firmenschrift der K.I.M.W. NRW GmbH, 2021, 14. Auflage
- [PBF+07] PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTHE K.-H.: *Konstruktionslehre*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2007, 7. Auflage

2

Werkzeugstähle und deren Beschichtbarkeit

Markus Pothmann

■ 2.1 Einführung in Werkzeugstähle

2.1.1 Definition von Werkzeugstählen

Werkzeugstähle sind eine Gruppe hochfester, hochverschleißfester Stähle, die speziell für die Verwendung bei der Herstellung von Werkzeugen und anderen Komponenten entwickelt wurden, die wiederholten Stößen, Abrieb und hohen Belastungen ausgesetzt sind. Diese Stähle haben in der Regel eine hohe Härte, Zähigkeit und Verformungsbeständigkeit, wodurch sie sich ideal für den Einsatz in Anwendungen eignen, die eine hohe Präzision und lange Werkzeuglebensdauer erfordern.

Die spezifischen Eigenschaften von Werkzeugstählen werden durch sorgfältiges Legieren und Wärmebehandeln erreicht. Legierungselemente wie Wolfram, Molybdän, Chrom und Vanadium werden dem Stahl zugesetzt, um seine Festigkeit, Verschleißfestigkeit und andere wichtige Eigenschaften zu verbessern. Die genaue Kombination dieser Elemente variiert je nach den spezifischen Anforderungen des herzustellenden Werkzeugs.

Werkzeugstähle werden aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften und ihres Verwendungszwecks typischerweise in mehrere Kategorien eingeteilt. Beispielsweise sind Schnellarbeitsstähle für den Einsatz in Hochgeschwindigkeitsbearbeitungsanwendungen konzipiert, während Kaltarbeitsstähle für den Einsatz in Anwendungen konzipiert sind, bei denen das Werkzeug extrem niedrigen Temperaturen ausgesetzt ist. Andere Kategorien von Werkzeugstählen umfassen Warmarbeitsstähle, Stähle für Kunststoffformen und stoßfeste Stähle.

Die hohe Festigkeit und Verschleißfestigkeit von Werkzeugstählen machen sie zu einem idealen Material für den Einsatz in einer Vielzahl industrieller Anwendungen, einschließlich Spritzguss. Die Auswahl des geeigneten Werkzeugstahls für eine bestimmte Anwendung kann jedoch ein komplexer Prozess sein, der eine sorgfältige Berücksichtigung von Faktoren wie der Art des zu formenden Kunststoffes, der gewünschten Oberflächenbeschaffenheit und der erforderlichen Werkzeugstandzeit erfordert.

2.1.2 Entwicklung der Werkzeugstähle

Die Entwicklung von Werkzeugstählen wurde durch die Notwendigkeit vorangetrieben, die Leistung und Langlebigkeit von Werkzeugen zu verbessern, die in verschiedenen industriellen Anwendungen verwendet werden. Im Laufe der Zeit haben Fortschritte in der Metallurgie, Wärmebehandlung und Herstellungstechniken zur Schaffung einer breiten Palette von Werkzeugstählen mit unterschiedlichen Eigenschaften und Merkmalen geführt.

Ein wichtiger Meilenstein in der Entwicklung von Werkzeugstählen war die Erfindung des Tiegelstahls Mitte des 19. Jahrhunderts. Diese neue Stahlsorte wurde durch Schmelzen von Eisen und Hinzufügen verschiedener Legierungselemente hergestellt, um ein homogeneres und konsistenteres Material zu schaffen. Es war auch möglich, größere Mengen von Tiegelstahl als andere Stahlsorten herzustellen, was ihn für Hersteller zugänglicher machte.

Im späten 19. und frühen 20. Jahrhundert wurden Werkzeugstählen neue Legierungselemente hinzugefügt, darunter Wolfram, Molybdän, Chrom und Vanadium. Diese Elemente verbesserten die Festigkeit, Zähigkeit und Verschleißfestigkeit von Werkzeugstählen erheblich und machten sie für anspruchsvolle industrielle Anwendungen besser geeignet.

Während des Zweiten Weltkriegs stieg die Nachfrage nach Werkzeugstählen dramatisch an, da sie in großem Umfang bei der Herstellung von Militärausrüstung verwendet wurden. Dies führte zu weiteren Fortschritten in der Werkzeugstahltechnologie, einschließlich der Entwicklung von Schnellarbeitsstählen, die den hohen Temperaturen widerstehen konnten, die durch die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung erzeugt werden.

Heute sind Werkzeugstähle nach wie vor ein wichtiger Werkstoff für eine Vielzahl von industriellen Anwendungen, einschließlich des Spritzgusses. Technologische Fortschritte erweitern weiterhin die Grenzen dessen, was mit Werkzeugstählen möglich ist, und es werden ständig neue Materialien und Fertigungstechniken entwickelt, um ihre Leistung und Zuverlässigkeit zu verbessern.

2.1.3 Arten von Werkzeugstählen

Werkzeugstähle werden aufgrund ihrer Eigenschaften und Verwendungszwecke in verschiedene Typen eingeteilt. Die Klassifizierung basiert typischerweise auf den Legierungselementen und der Wärmebehandlung, die erforderlich sind, um bestimmte Eigenschaften zu erreichen.

Kohlenstoff-Werkzeugstähle

Kohlenstoff-Werkzeugstähle wie etwa C75 oder C100S sind die älteste und einfachste Art von Werkzeugstahl. Sie haben einen Kohlenstoffgehalt von 0,6% bis 1,5%. Diese Stähle sind preiswert und einfach zu wärmebehandeln, was sie ideal für kleine Werkzeuge macht, die keine hohe Präzision erfordern. Kohlenstoff-Werkzeugstähle werden üblicherweise für Meißel, Messer und Handwerkzeuge verwendet.

Schnellarbeitsstähle

Schnellarbeitsstähle sind für Hochgeschwindigkeitsbearbeitungsanwendungen ausgelegt, bei denen die Schnittgeschwindigkeit 50 Meter pro Minute übersteigt. Sie enthalten Wolfram, Molybdän und Vanadium als Legierungselemente. Diese Stähle haben ein hohes Maß an Härte, Verschleißfestigkeit und Zähigkeit, was sie ideal für Schneid- und Bohrwerkzeuge macht. Schnellarbeitsstähle werden üblicherweise für Schneidwerkzeuge in der Automobil-, Luft- und Raumfahrt- und medizinischen Industrie verwendet.

Stoßfeste Werkzeugstähle

Stoßfeste Werkzeugstähle wie etwa 1.2714 oder 1.2355 sind darauf ausgelegt, Stoßbelastungen standzuhalten. Sie enthalten Chrom, Molybdän und Vanadium als Legierungselemente. Diese Stähle werden für Anwendungen verwendet, die eine hohe Zähigkeit und Beständigkeit gegen Rissbildung erfordern, wie z. B. Kaltmeißel, Hämmer und andere handgeführte Werkzeuge.

Warmarbeitsstähle

Warmarbeitsstähle wie etwa 1.2343 oder 1.2344 sind für den Einsatz in Hochtemperaturanwendungen konzipiert, bei denen das Werkzeug hoher Beanspruchung und Verschleiß ausgesetzt ist. Sie enthalten Wolfram, Molybdän und Chrom als Legierungselemente. Diese Stähle haben ein hohes Maß an Zähigkeit, Verschleißfestigkeit und thermischer Stabilität, wodurch sie ideal für den Einsatz in Schmiedewerkzeugen, Strangpresswerkzeugen und anderen Warmarbeitsanwendungen sind.

Kaltarbeitsstähle

Kaltarbeitsstähle wie etwa 1.2379 oder 1.2510 sind für den Einsatz in Kaltarbeitsanwendungen konzipiert, bei denen das Werkzeug hoher Beanspruchung und Verschleiß ausgesetzt ist. Sie enthalten Wolfram, Molybdän und Vanadium als Legierungselemente. Diese Stähle haben ein hohes Maß an Härte, Zähigkeit und Verschleißfestigkeit, was sie ideal für den Einsatz in Stanzwerkzeugen und anderen Kaltarbeitsanwendungen macht.

Kunststoffformenstähle

Kunststoffformenstähle wie etwa 1.2311 oder 1.2738 sind für den Einsatz beim Spritzgießen und anderen Kunststoffformen bestimmt. Sie enthalten Chrom, Molybdän und Vanadium als Legierungselemente. Diese Stähle haben ein hohes Maß an Härte, Verschleißfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit, was sie ideal für den Einsatz in Kunststoffformanwendungen macht.

Hochfeste niedriglegierte (HSLA-) Werkzeugstähle

HSLA-Werkzeugstähle wie etwa S700MC sind für den Einsatz in hochfesten Anwendungen konzipiert, bei denen das Werkzeug hoher Beanspruchung und Verschleiß ausgesetzt ist. Sie enthalten Molybdän, Chrom und Vanadium als Legierungselemente. Diese Stähle haben ein hohes Maß an Härte, Zähigkeit und Verschleißfestigkeit, was sie ideal für den Einsatz in hochbelasteten Anwendungen wie Zahnrädern und Wellen macht [Tir17].

Pulvermetallurgische Werkzeugstähle

Pulvermetallurgische Werkzeugstähle werden durch Mischen und Pressen feiner Metallpulver hergestellt, die dann bei hohen Temperaturen gesintert werden. Diese Stähle haben ein hohes Maß an Dichte, Zähigkeit und Verschleißfestigkeit, was sie ideal für den Einsatz in hochbelasteten Anwendungen wie Schneidwerkzeugen, Matrizen und anderen Präzisionskomponenten macht.

Hochlegierte Werkzeugstähle

Hochlegierte Werkzeugstähle wie etwa 1.3247 sind für den Einsatz in Anwendungen konzipiert, die eine hohe Festigkeit und Verschleißfestigkeit erfordern. Sie enthalten einen hohen Anteil an Legierungselementen wie Wolfram, Molybdän.

2.1.4 Faktoren, die die Materialauswahl bei Spritzguss-Werkzeugstählen beeinflussen

Die Auswahl des richtigen Werkstoffs für Spritzguss-Werkzeugstähle wird von mehreren Faktoren beeinflusst, darunter:

- **Formteilkomplexität:** Die Komplexität des zu formenden Teils kann sich auf die Auswahl des Werkzeugstahls auswirken. Zum Beispiel können Formteile mit komplizierten Designs einen Werkzeugstahl mit höherer Zähigkeit und Verschleißfestigkeit erfordern, um dem Formprozess standzuhalten.
- **Teilegröße:** Die Größe des zu formenden Teils kann sich auch auf die Auswahl des Werkzeugstahls auswirken. Größere Formteile erfordern möglicherweise einen Werkzeugstahl mit höherer Wärmeleitfähigkeit und besserer Wärmeab-

leitung, um ein Verziehen und Reißen während des Formprozesses zu verhindern.

- **Produktionsvolumen:** Auch das Volumen der produzierten Formteile kann die Materialauswahl beeinflussen. Die Massenproduktion kann einen Werkzeugstahl erfordern, der der hohen Hitze und Belastung des Dauereinsatzes standhalten kann, während die Produktion in geringeren Mengen die Verwendung von weniger teuren Werkzeugstählen ermöglichen kann.
- **Formmaterial:** Auch das Formmaterial kann die Auswahl des Werkzeugstahls beeinflussen. Unterschiedliche Materialien haben unterschiedliche Schmelzflusseigenschaften und thermische Eigenschaften, die die Verschleißfestigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Gesamtleistung des Werkzeugstahls beeinflussen können.

2.1.5 Herausforderungen bei der Auswahl von Spritzguss-Werkzeugstählen

Die Auswahl des richtigen Werkzeugstahls für den Spritzguss kann aufgrund der zahlreichen Faktoren, die sich auf die Materialauswahl auswirken können, eine Herausforderung darstellen. Einige der Herausforderungen umfassen:

- **Abwägen von Leistung und Kosten:** Hochleistungs-Werkzeugstähle haben oft einen höheren Preis, was es schwierig macht, die gewünschte Leistung mit den Materialkosten in Einklang zu bringen.
- **Kompatibilität mit dem Spritzgussverfahren:** Der Werkzeugstahl muss mit dem spezifischen Spritzgussverfahren kompatibel sein, das verwendet wird. Dazu gehört die Fähigkeit des Werkzeugstahls, den Temperatur- und Druckänderungen während des Formprozesses standzuhalten.
- **Kundenspezifische Werkzeugstähle:** In einigen Fällen können kundenspezifische Werkzeugstähle erforderlich sein, um die spezifischen Anforderungen der Anwendung zu erfüllen. Das kann die Komplexität und die Kosten des Werkzeugstahlauswahlprozesses erhöhen.

2.1.6 Zukünftige Entwicklung von Spritzguss-Werkzeugstählen

Da sich die Fertigungsindustrie ständig weiterentwickelt und die Anforderungen an höhere Qualität, Effizienz und Nachhaltigkeit steigen, wird der Bedarf an fortschrittlichen Materialien und Technologien im Spritzguss immer wichtiger. Die Entwicklung neuer und verbesserter Spritzguss-Werkzeugstähle ist unerlässlich, um den Anforderungen der Industrie gerecht zu werden.

In den letzten Jahren wurden erhebliche Fortschritte bei der Entwicklung von Werkzeugstählen für den Spritzguss erzielt, wobei der Schwerpunkt auf der Verbesserung von Eigenschaften wie Verschleißfestigkeit, Zähigkeit und Korrosionsbeständigkeit lag. Es gibt jedoch noch Raum für Verbesserungen, und die Zukunft der Spritzguss-Werkzeugstähle ist spannend.

Einer der Schlüsselbereiche der Entwicklung von Spritzguss-Werkzeugstählen ist die Einarbeitung fortschrittlicher Legierungselemente. Beispielsweise ist Bor dafür bekannt, die Zähigkeit und Verschleißfestigkeit von Werkzeugstählen zu verbessern, während Stickstoff die Korrosionsbeständigkeit und Ermüdungsfestigkeit verbessern kann. Andere Elemente wie Kupfer und Nickel können ebenfalls eingebracht werden, um spezifische Eigenschaften zu verbessern.

Neben neuen Legierungselementen werden auch Fortschritte in der Mikrostrukturtechnik erforscht. Der Einsatz fortschrittlicher Wärmebehandlungstechniken wie Abschrecken und Anlassen kann eine gleichmäßigere Mikrostruktur erzeugen und die mechanischen Eigenschaften des Werkzeugstahls verbessern. Auch die Einarbeitung nanoskaliger Partikel wie Karbide kann die Verschleißfestigkeit des Werkzeugstahls erhöhen.

Ein weiterer Entwicklungsbereich ist die Verwendung von Oberflächenbeschichtungen oder -behandlungen zur Verbesserung der Leistung von Spritzgusswerkzeugen. Beispielsweise können Beschichtungen mit diamantähnlichem Kohlenstoff (DLC) die Verschleißfestigkeit des Werkzeugstahls erhöhen, während Oberflächenbehandlungen wie Nitrieren die Oberflächenhärte und Korrosionsbeständigkeit verbessern können.

Die zunehmende Forderung nach Nachhaltigkeit in der Fertigung treibt auch die Entwicklung umweltfreundlicherer Spritzguss-Werkzeugstähle voran. Die Verwendung von recycelten Materialien wie Stahlschrott und anderen Metallen wird untersucht, um Abfall zu reduzieren und die Umweltauswirkungen des Herstellungsprozesses zu minimieren.

Insgesamt konzentriert sich die Zukunft der Spritzguss-Werkzeugstähle darauf, die Eigenschaften und Leistung dieser Materialien zu verbessern, um den sich entwickelnden Anforderungen der Fertigungsindustrie gerecht zu werden. Die Integration fortschrittlicher Legierungselemente, Mikrostrukturtechnik, Oberflächenbeschichtungen und Nachhaltigkeitsinitiativen werden alle eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung der nächsten Generation von Spritzguss-Werkzeugstählen spielen.

■ 2.2 Eigenschaften von Werkzeugstählen

2.2.1 Einführung in Spritzguss-Werkzeugstähle

Spritzgießen ist ein Herstellungsverfahren, das zur Herstellung einer breiten Palette von Kunststoffformteilen und -produkten verwendet wird. Beim Spritzgießen werden Kunststoffpellets oder -granulate geschmolzen und in einen Formhohlraum gespritzt, wo sie abkühlen und sich verfestigen, um das gewünschte Formteil zu bilden. Spritzgießen ist ein hocheffizientes und kostengünstiges Verfahren und damit eines der beliebtesten Verfahren zur Herstellung von Kunststoffformteilen.

Spritzgusswerkzeuge sind eine kritische Komponente des Spritzgussverfahrens. Die Werkzeuge müssen so konstruiert und hergestellt werden, dass sie den Belastungen des Formprozesses standhalten. Spritzguss-Werkzeugstähle sind speziell für die Verwendung in Spritzgusswerkzeugen konzipiert und müssen eine einzigartige Kombination von Eigenschaften besitzen, um den Belastungen des Formprozesses standzuhalten.

Werkzeugstähle sind eine Gruppe hochfester Stähle, die zum Schneiden, Umformen und Formen von Materialien verwendet werden. Sie sind bekannt für ihre hohe Härte, Verschleißfestigkeit und Zähigkeit. Spritzguss-Werkzeugstähle müssen ähnliche Eigenschaften wie Standard-Werkzeugstähle aufweisen, müssen aber auch spezifische Eigenschaften aufweisen, um den hohen Drücken, Temperaturen und dem Abrieb im Zusammenhang mit dem Spritzgussverfahren standzuhalten.

Die Eigenschaften von Spritzguss-Werkzeugstählen werden durch ihre Zusammensetzung, Mikrostruktur und Wärmebehandlung beeinflusst. Die Zusammensetzung des Stahls ist entscheidend für die Bestimmung seiner mechanischen Eigenschaften, einschließlich Härte, Zähigkeit und Verschleißfestigkeit. Die Mikrostruktur des Stahls, die durch den Wärmebehandlungsprozess beeinflusst wird, spielt eine entscheidende Rolle bei der Bestimmung der mechanischen Eigenschaften des Stahls.

Die Auswahl des geeigneten Spritzguss-Werkzeugstahls für eine bestimmte Anwendung ist entscheidend für den Erfolg des Formprozesses. Zu den Faktoren, die bei der Auswahl eines Werkzeugstahls berücksichtigt werden müssen, gehören die Art des zu formenden Kunststoffs, das erwartete Produktionsvolumen und die erwartete Werkzeuglebensdauer.

Zusammenfassend sind Spritzguss-Werkzeugstähle eine kritische Komponente des Spritzgussprozesses. Sie müssen sorgfältig ausgewählt werden, um sicherzustellen, dass sie die notwendigen Eigenschaften besitzen, um den Belastungen des Formgebungsprozesses standzuhalten. Auf die spezifischen Eigenschaften von Spritzguss-Werkzeugstählen und ihren Einfluss auf die Eignung für unterschiedliche Anwendungen wird im nächsten Abschnitt näher eingegangen.

2.2.2 Eigenschaften von Spritzguss-Werkzeugstählen

Spritzguss-Werkzeugstähle werden aufgrund ihrer Fähigkeit ausgewählt, den Belastungen des Spritzgussverfahrens standzuhalten. Sie müssen bestimmte Eigenschaften aufweisen, um sicherzustellen, dass sie dem hohen Druck, der hohen Temperatur und dem Abrieb im Zusammenhang mit dem Formgebungsprozess standhalten. In diesem Kapitel wird auf die wichtigen Eigenschaften von Spritzguss-Werkzeugstählen eingegangen und wie diese ihre Eignung für den Einsatz im Spritzguss beeinflussen.

Härte

Die Härte von Spritzguss-Werkzeugstählen ist eine wichtige Eigenschaft, die ihre Beständigkeit gegen Verschleiß und Verformung bestimmt. Je härter der Werkzeugstahl ist, desto widerstandsfähiger ist er gegen Verschleiß und Verformung unter Hochdruckformbedingungen. Mit zunehmender Härte nimmt jedoch die Zähigkeit des Werkzeugstahls ab. Damit der Werkzeugstahl den Belastungen des Formgebungsprozesses standhält, muss ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Härte und Zähigkeit gefunden werden.

Zähigkeit

Zähigkeit ist die Fähigkeit eines Materials, Rissen oder Brüchen unter Bedingungen hoher Belastung zu widerstehen. Beim Spritzgießen werden Werkzeugstähle stark beansprucht und müssen eine hohe Zähigkeit aufweisen, um Risse oder Brüche zu vermeiden. Die Zähigkeit wird durch die Mikrostruktur des Werkzeugstahls sowie seine Legierungselemente und Wärmebehandlung beeinflusst.

Verschleißfestigkeit

Spritzguss-Werkzeugstähle müssen eine hohe Verschleißfestigkeit aufweisen, um eine Beschädigung der Werkzeugoberfläche zu vermeiden. Die Verschleißfestigkeit wird durch die Härte des Werkzeugstahls sowie dessen Gefüge und Legierungselemente beeinflusst. Werkzeugstähle mit hoher Verschleißfestigkeit werden typischerweise in Anwendungen eingesetzt, in denen die Werkzeugoberfläche einem hohen Grad an Abrieb ausgesetzt ist, wie z. B. bei der Herstellung von abrasiven Materialien oder Teilen mit rauen Oberflächen.

Korrosionsbeständigkeit

Korrosionsbeständigkeit ist eine wichtige Eigenschaft für Werkzeugstähle, die beim Spritzgießen verwendet werden, da der Spritzgussprozess korrosiv sein kann. Werkzeugstähle mit hoher Korrosionsbeständigkeit werden typischerweise in Anwendungen verwendet, in denen das Werkzeug korrosiven Materialien oder

Umgebungen ausgesetzt ist. Die Korrosionsbeständigkeit von Werkzeugstählen wird durch ihre Legierungselemente, insbesondere Chrom und Molybdän, beeinflusst.

Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit von Spritzguss-Werkzeugstählen ist wichtig, um eine gleichmäßige Temperatur im gesamten Werkzeug aufrechtzuerhalten. Werkzeugstähle mit hoher Wärmeleitfähigkeit sind besser in der Lage, Wärme von der Formteilerfläche abzuleiten, reduzieren das Risiko von Hot Spots und verbessern die Gesamtqualität der Formteile. Die Wärmeleitfähigkeit von Werkzeugstählen wird durch ihre Legierungselemente, insbesondere Kupfer und Nickel, beeinflusst.

Bearbeitbarkeit

Die Bearbeitbarkeit ist eine wichtige Eigenschaft für Spritzguss-Werkzeugstähle, da sie maschinell bearbeitet werden müssen, um die für das Formen erforderlichen komplexen Formen zu erzeugen. Werkzeugstähle mit guter Zerspanbarkeit sind leichter zu bearbeiten und führen zu weniger Verschleiß an den Schneidwerkzeugen. Die Bearbeitbarkeit wird durch die Mikrostruktur des Werkzeugstahls sowie seine Legierungselemente und Wärmebehandlung beeinflusst [RM05].

Zusammenfassend spielen die Eigenschaften von Spritzguss-Werkzeugstählen eine entscheidende Rolle bei der Bestimmung ihrer Eignung für verschiedene Anwendungen. Die in diesem Kapitel erörterten Eigenschaften, einschließlich Härte, Zähigkeit, Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Bearbeitbarkeit, müssen bei der Auswahl eines Werkzeugstahls für den Spritzguss sorgfältig berücksichtigt werden. Im nächsten Kapitel gehen werden die verschiedenen Arten von Werkzeugstählen und ihre spezifischen Eigenschaften vorgestellt, die üblicherweise im Spritzguss verwendet werden.

2.2.3 Zusammensetzung von Spritzguss-Werkzeugstählen

Spritzguss-Werkzeugstähle wie 1.2344 oder 1.2311 sind Hochleistungswerkstoffe, die den extremen Bedingungen des Spritzgussverfahrens standhalten. Diese Stähle sind speziell formuliert, um eine hervorragende Festigkeit, Zähigkeit, Verschleißfestigkeit und thermische Stabilität zu bieten und eine lange Lebensdauer und konstante Leistung des Spritzgusswerkzeugs zu gewährleisten. Die Zusammensetzung von Spritzguss-Werkzeugstählen spielt eine entscheidende Rolle bei der Bestimmung ihrer Eigenschaften und Eignung für verschiedene Anwendungen. In diesem Kapitel werden die verschiedenen Arten von Werkzeugstählen und ihre Zusammensetzung vorgestellt, die beim Spritzgießen verwendet werden.

Niedriglegierte Werkzeugstähle

Niedriglegierte Werkzeugstähle werden aufgrund ihrer hervorragenden Kombination aus Zähigkeit und Verschleißfestigkeit häufig bei der Herstellung von Spritzgusswerkzeugen verwendet. Diese Werkzeugstähle enthalten einen geringen Prozentsatz an Legierungselementen, typischerweise weniger als 5%, darunter Chrom, Molybdän und Vanadium. Der Kohlenstoffgehalt in diesen Werkzeugstählen liegt zwischen 0,3% und 0,6% und sie werden oft wärmebehandelt, um die gewünschten Eigenschaften zu erreichen.

Hochlegierte Werkzeugstähle

Hochlegierte Werkzeugstähle sind so konzipiert, dass sie eine außergewöhnliche Verschleißfestigkeit, Zähigkeit und Korrosionsbeständigkeit bieten. Diese Werkzeugstähle enthalten einen höheren Anteil an Legierungselementen als niedriglegierte Werkzeugstähle, oft über 5%. Chrom, Molybdän, Vanadium und Wolfram sind häufig verwendete Legierungselemente in hochlegierten Werkzeugstählen. Der Kohlenstoffgehalt in hochlegierten Werkzeugstählen liegt zwischen 0,7% und 1,5% und sie werden typischerweise wärmebehandelt, um die gewünschten Eigenschaften zu erreichen.

Schnellarbeitsstähle

Schnellarbeitsstähle werden zur Herstellung von Spritzgusswerkzeugen verwendet, die hohe Schnittgeschwindigkeiten und Temperaturen erfordern, wie sie beispielsweise für die Bearbeitung von duroplastischen Kunststoffen verwendet werden. Diese Werkzeugstähle enthalten typischerweise hohe Gehalte an Kohlenstoff, Wolfram, Molybdän und Chrom. Der hohe Kohlenstoffgehalt in Schnellarbeitsstählen reicht von 0,8% bis 1,5%, während die Legierungselemente typischerweise in Mengen von 7% bis 20% vorhanden sind. Schnellarbeitsstähle werden wärmebehandelt, um die gewünschten Eigenschaften zu erreichen, einschließlich hoher Härte, Verschleißfestigkeit und Zähigkeit.

Warmarbeitsstähle

Warmarbeitsstähle sind darauf ausgelegt, den hohen Temperaturen und Drücken beim Spritzgießen standzuhalten. Diese Werkzeugstähle enthalten typischerweise einen hohen Prozentsatz an Chrom, Molybdän und Vanadium sowie andere Legierungselemente wie Wolfram, Kobalt und Nickel. Der Kohlenstoffgehalt in Warmarbeitsstählen liegt zwischen 0,4% und 1,4%, und sie werden wärmebehandelt, um die gewünschten Eigenschaften zu erreichen, einschließlich hoher Härte, Zähigkeit und thermischer Stabilität.

Kaltarbeitsstähle

Kaltarbeitsstähle werden zur Herstellung von Spritzgusswerkzeugen verwendet, die eine hohe Verschleißfestigkeit, Zähigkeit und Maßhaltigkeit erfordern. Diese Werkzeugstähle enthalten typischerweise einen kleinen Prozentsatz an Legierungselementen, einschließlich Chrom, Molybdän, Vanadium und Wolfram. Der Kohlenstoffgehalt in Kaltarbeitsstählen liegt zwischen 0,5% und 1,5%, und sie werden häufig wärmebehandelt, um ihre gewünschten Eigenschaften zu erreichen.

Maraging-Werkzeugstähle

Maraging-Werkzeugstähle sind hochfeste, niedriglegierte Stähle, die üblicherweise bei der Herstellung von Spritzgusswerkzeugen verwendet werden. Diese Werkzeugstähle enthalten einen kleinen Prozentsatz an Kohlenstoff, typischerweise weniger als 0,03%, und einen hohen Prozentsatz an Nickel, Kobalt und Molybdän. Maraging-Werkzeugstähle werden wärmebehandelt, um ihre gewünschten Eigenschaften zu erreichen, zu denen hohe Festigkeit, Zähigkeit und Verschleißfestigkeit gehören.

Pulvermetallurgische Werkzeugstähle

Pulvermetallurgische Werkzeugstähle werden durch ein Verfahren hergestellt, bei dem pulverförmiger Werkzeugstahl mit einem Bindemittel gemischt und die Mischung dann in eine gewünschte Form verdichtet wird. Diese Werkzeugstähle bieten eine hervorragende Verschleißfestigkeit, Zähigkeit und Dimensionsstabilität, wodurch sie sich ideal für den Einsatz in Spritzgusswerkzeugen eignen. Pulvermetallurgische Werkzeugstähle enthalten typischerweise hohe Anteile an Legierungselementen wie Chrom, Molybdän und Vanadium, und ihr Kohlenstoffgehalt liegt im Bereich von 0,4% bis 2,5%. Sie werden wärmebehandelt, um ihre gewünschten Eigenschaften zu erreichen.

Edelstähle

Edelstähle sind eine Gruppe korrosionsbeständiger Stähle, die üblicherweise bei der Herstellung von Spritzgusswerkzeugen verwendet werden. Diese Werkzeugstähle enthalten mindestens 10,5% Chrom, was eine hervorragende Korrosionsbeständigkeit bietet. Sie enthalten auch unterschiedliche Mengen an anderen Legierungselementen wie Nickel und Molybdän, die ihre mechanischen Eigenschaften verbessern können. Rostfreie Stähle sind in mehreren verschiedenen Sorten erhältlich, jede mit ihrer eigenen einzigartigen Kombination von Eigenschaften, und sie werden oft wärmebehandelt, um ihre Festigkeit und Zähigkeit zu verbessern.

Index

Symbole

3D-Fähigkeit 59
3D-Konformität 102
3-Omega 231

A

Abbildungsartefakte 124
Abbildungstreue 164
Ablagerungsproblem 264
Abplatzen 284
Abprodukte 304
Abrasion 274
abrasive Füllstoffe 283
Abrasier Verschleiß 290
Abrieb 268, 288
Abriebfestigkeit 271
Abriebvergleichswert 268, 287
Abscheidedauer 67
Abscheiderate 65, 68
Abscheidetemperatur 60, 305
Abscheidung
– elektrolytische 31
Abscheidungsprozess 46
Absorption 166, 167
Absorptionkoeffizienten 183
Absorptionsbanden 171
Absorptionsmuster 172
Abtragsrate 269
abzuförmende Oberfläche 328
Aceton-Äquivalent 255
Acetylacetonate 56
Adatom 43, 46
Additive 343
Adhäsion 339
Adhäsionstest 278
adhäsiver Verschleiß 290
Admittanz 198
Adsorption 250
amorphe Thermoplaste 349
Anfahrverhalten 364
Anforderungen an die Materialien 268
Anforderungsliste 5
Anionen 192
Anlassen 21
Anode 32, 75, 185, 300
anorganische Retrosynthese 81
Anregungspotential 195
Ansprechdynamik 361
Arbeitselektrode 205, 206
Aspektverhältnis 59, 284
Atomic Force Microscopy 190
ATR-FTIR-Spektroskopie 176
ATR-Kristall 177
Attenuated Total Reflection 176
Aufbereitung 257
Aufladung 131
Auflagekraft 115
Auflösungsvermögen 122, 157, 160
Aufnahme von Emissionen 261
Aufschubkraft 239
Aufwachsrate 42
Aufwölben 222
Ausscheidungsprozess 329
Außenstromlose Beschichtung 34
Austrittstiefe der Fluoreszenz 189

Auswahl von Spritzguss-
Werkzeugstählen 25
Auswerfer 241, 343
Auswerferabdruck 4
Auswerfersystem 238
Avogadro-Konstante 183

B

Backgroundspektrum 178
Barrierschutzschicht
– thermische 41
Bauteiloberfläche 314
Beanspruchungsprofil 274
Bearbeitbarkeit 17
Bedampfen 42
Belag 308, 328, 335
Belagbildung 3, 256, 264, 329, 331,
337, 344
Belagsreduzierung 336
Belastungsrate 211
Berkovich-Pyramide 212
Beschichtbare Werkstoffe 38
Beschichtung 291
Beschichtung der Oberfläche 285
Beschichtungsbad 30
Beschichtungsgerechte Konstruktion 37
Beschichtungsguidelines 39
Beschichtungstauglichkeit 37
Beschichtungszeit 69
Beschleunigungsspannung 124, 129
Bindenahrt 2, 314, 325, 367
Bindenahrtfestigkeit 325
Bindenahrtkerbe 314, 324
Bindung
– Ionen 49
– kovalente 49, 171, 178
– metallische 49, 178
– Physikalische 49
Bindungen in Polymeren 171, 174
Bindungsenergie 183, 341
Blasenbildungstemperatur 68
Blauversprödung 335
bleibende Verformung 215
Bode-Diagramm 199, 202

Brechungsindex 122
Brinellärte 209, 210
Bruchstücke 253
BSE 124
BSE-Sensor 132
Bulk-Material-Synthese 90

C

Center-Burst 161
Chemische Gasphasenabscheidung 53,
283, 285, 308, 310, 320, 342
– Feststoffbasierte 65
– Metallorganische 53
– Plasmabasierte 74
chemische Korrosion 300
chemisch Nickel 34, 294, 304
chemisch Nickel-Schichten 34
Chemosynthese 65
Chromatogramm 260
chromatographische Säule 250
Comptonstreuung 182
Constant Phase Element 198
Coulombsches Gesetz 253
Cube-Corner-Pyramide 212
CVD 53
CVD-Charakteristik 66
CVD-Reaktor 103

D

Dampfdruck 67, 80, 92
– Precursor 56
de-Broglie-Wellenlänge 123
Deformation 342
Deformation beim Entformen 3
Deformationsschwingungen 168
Dehnratenabhängigkeit 211
Dehnungsmodul 218
Delamination 49
Desorption 250
Desorptionsröhrchen 262
Dichte 230
Dichtheit der Beschichtung 303
Diseleffekt 335

Diffusion *55, 193, 301*
Diffusionsvorgang *198*
Dispersionskraft *340*
Dispersionschichten *35, 294*
Dispersoide *35*
Disproportionierung *65*
DLC-Beschichtung *22, 76*
Doppelschichtkapazität *200, 202*
Dosiervorrichtung *71*
Drehmoment *244*
Dreielektrodenanordnung *205*
Druckaufnehmer *351*
Drucksensor *348*
Dünnschichtsensor *355, 363*
Dünnschichtsensorik *348*
Dünnschichtthermoelement *356*
dynamische Temperiertechnik *314, 370*
dynamische Temperierverfahren *367*

E

Edelstähle *19*
EDX *129*
EDX-Sensor *136*
EDX-Spektrum *136, 138*
Eigenabsorption *172*
Eigenspannung *284*
Einbringen von Ionen *45*
Eindringarbeit *220*
Eindringfläche *218*
Eindringhärte *215*
Eindringhärte der Schicht *225*
Eindringkörper *212, 225*
Eindringkörpergeometrie *216*
Eindringkriechen *219*
Eindringmodul *218*
Eindringmodul der Schicht *224*
Eindringrelaxation *220*
Eindringtiefe *118, 209, 211, 216, 220, 223, 224*
Eindringversuch *222*
Einfriereffekt *332*
eingefrorene Randschicht *322*
einlagige Beschichtung *50*
Einsinken *222*
Einspritzgeschwindigkeit *313*
Einzelschicht *221*
Einzelwiderstand *194*
elastischer Arbeit *220*
elastische Verformung *211*
elektrische Heizleiter *369*
elektrische Passivierung *359*
elektrischer Schwingkreis *203*
elektrischer Strom *194*
elektrischer Widerstand *201*
elektrisches Ersatzschaltbild *203*
elektrische Spannung *194*
elektrochemische Doppelschicht
198, 200
elektrochemische Impedanzspektro-
skopie *192*
Elektrode *205*
Elektrolyse *31*
Elektrolyt *205, 300*
elektromagnetische Strahlung *166*
Elektronen *74, 183*
Elektronenmangel *300*
Elektronenreflexionsvermögen *127*
Elektronenschale *184*
Elektronenstoß *128*
Elektronenstrahl
– Verdampfen mittels *43*
Elektronenstrahlen *187*
Elektronentransfer *192*
Elektronenübergang *184*
Elektronenüberschuss *300*
Elementanalyse *141*
elementweise Aufschlüsselung *137*
Emissionen *248, 260, 261, 328*
Emissionsmessung *263, 265*
Emissionswerkzeug *264*
Empfindlichkeit *165*
energiedispersive RFA *185*
energiedispersives Spektrometer *128*
Energieeffizienz *367*
Energieübertragung *168*
Energieverteilung *127*
Entformung *338, 342, 352*
Entformungskraft *238, 239, 341*
Entformungsprozess *241*

- Entformungsschräge 338
 Entformungstemperatur 344
 Entformungsverhalten 336, 343
 Enthftungseffekte 277
 Entlastungsrate 211
 Entlüftung 331, 334
 Entlüftungskanal 262
 Entlüftungsmöglichkeiten 334
 Entlüftungsweg 334
 Entstehungsbereiche der Elektronen 127
 erhöhte Temperatur 324
 Ermüdung 211
 Ermüdungsprozess 269
 Ermüdungsverschleiß 290
 Ersatzschaltbild 201, 306
 Erweichungstemperatur 314
 Erzeugung der Röntgenstrahlung 129
- F**
- Faraday-Käfig 206
 Fehlstelle 357
 Feiltest 277, 281
 Festkörperlaser 144
 Feststoffförderer 70
 Feststoffpartikel 69
 Filterelement 261
 Finite-Elemente-Methode 99
 flache Bereiche 65
 Flächenkorrosion 301
 Flächenrauheit 134
 Flanschttemperatur 333
 Fließverhalten 323
 Fließweg 256, 362
 Fließwegende 352
 Fließweglänge 228, 322
 Flüchtigkeit 84, 85, 88
 Fluoreszenzstrahlung 182
 Flüssigkeitsregler 58
 Fokusebene 144
 Förderraten 71
 Förderung des festen Precursors 69
 Formteilqualität 371
 Fourier-Transform-Technik 175
 Fragmentmasse 253
- Frank-van-der-Merwe-Modell 47
 Freistrahl-Prüfstand 269
 Frequenz 167
 Frequenzbereich 193, 203
 Frequenzganganalysator 205
 FTIR-Absorptionsspektrum 173, 174
 FTIR-Spektroskopie 166
 FTIR-Spektrum 175
 Füllstudie 350
 funktionale Schicht 284
 funktionelle Gruppen 171
- G**
- galvanische Beschichtung 304
 galvanische Halbzelle 300
 galvanische Schichten 30, 292
 galvanisches Element 300
 Galvanisieren 23
 Galvanostat 205
 Gaschromatographie 248, 261
 Gasgemisch 255
 Gasgeschwindigkeit
 – Simulation 106
 Gasphasenabscheidung
 – chemische 53
 – physikalische 41
 Gefügestruktur 269
 Gesamtbild 146
 Gesamtwiderstand 194
 Gestaltabweichung 157
 Gitterfehler 47
 Gittermuster 278
 Gitterschnitt 277, 278
 Glanzgrad 268, 315, 321
 Glanzgradunterschiede 336
 Glanzunterschiede 2, 328
 Glasfasern 283
 Glasübergangstemperatur 229, 319, 370
 Gleichgewichtsdampfdruck 69
 Gleichspannung 197
 Gleichstromspattern 44
 Gleitintegral 343
 Gleitreibkoeffizient 240
 Gleitreibmoment 243, 344

Glimmentladung 74
Glühen 21
gradierte Beschichtung 50
Grenzfläche 215

H

haftfeste Anbindung 369
Haftfestigkeit 304
Haftkräfte 338
Haftmoment 243, 343, 344
Haftreibkoeffizient 240
Haftung 284
Haftungsbeurteilung 287
Haftungsbewertung 277
Haftungsmechanismen 46
Haftung von Beschichtungen 278
Härte 16, 283, 288
Härteeindruck 281
Härteindringprüfung 287
Härtemessung 287
Härten 21
Härteprüfverfahren 209
Härtetest nach Rockwell 279
Hartstoffschicht 76, 283
Hartverchromung 292
Hauptschubspannung 222
Heißgaskorrosion 301, 307, 335
Heißwandreaktor 53, 58
Heizelement 367
Heizschichten 367
Helmholtzschicht 200
Hinterschneidungen 59, 238, 284,
338, 342
hochfeste niedriglegierte Werkzeug-
stähle 12
Hochfrequenzbereich 197
Hochfrequenzspattern 45
Hochglanzoberflächen 343, 367
Hochglanzpolitur 241, 338
hochlegierte Werkzeugstähle 12, 18
Hochtemperaturoxidation 192
Höhenkartierung 164
Höhenprofil 135
Höhenunterschiede 144, 157

homogene Beschichtung 59
Hybridschichten 297
Hydroxidschicht 192

I

Identifizierung des Polymers 171
Impedanz 196
Impedanzspektroskopie 192, 205, 306
Impedanzspektrum 205
Impulsübertragung 44
Indentation Size Effect 214
Indikatorelemente 36
Indikatorschicht 36
Induktivität 197
infraroter Spektralbereich 166
Infrarotspektroskopie 166, 170, 178
Infrarotstrahl 177
Innenbeschichtung 59
innenliegende Bereiche 65
Intensität 185, 189
Intensitätsmuster 162
Intensitätsverteilung 146, 151
Interferenzmuster 162
Interferogramm 176
Interferometer 160
Ionen 74
Ionenbindung 49
Ionenplattieren 45
Ionisation 253
Isolationsvermögen 356

K

Kalibrierstandard 188
Kalottendurchmesser 118
Kalottenschliff 115, 152, 189, 287
Kaltarbeitsstähle 11, 19
Kaltwandreaktor 53
Kapazität 197
Katalysator 65
Kathode 31, 75, 185, 300
Kationen 192
Kavitätsoberfläche 343
Keimwachstum 47

- kinetische Energie 46
Kippschwingungen 168
Kleinlast-Vickers-Prüfgerät 281
kohärentes Licht 162
Kohlenstoff-Werkzeugstähle 11
Kombination einzelner Schichten 50
Komplexität
– Precursor 81
Kondensator 197, 200
konfokales Messprinzip 143
Konizität 338
konstantes Phasenelement 198
konstruktive Interferenz 163
Kontaktfläche 339
Kontakttemperatur 229, 317
Kontakttiefe 215, 218
Kontaminierung 342
konturnahe Heizleiter 367
Konvektion 55
Konzentration 189
Korngrenze 302
Korngröße 281
Korrosion 274, 300, 335, 342
Korrosionsanfälligkeit 308
Korrosionsbeständigkeit 16, 192, 297, 307
Korrosionsneigung 302
Korrosionsprobleme 265
Korrosionsprodukte 303
Korrosionsprozess 192
Korrosionsschutz 203, 302
Korrosionsschutzschichten 300, 304
Korrosionsursache 302
Korrosionsverhalten 310
Korrosionsvorgang 198
Korrosionswiderstand 200
korrosive Nebenprodukte 92
kovalente Bindung 49, 171, 178
Kraftaufnehmer 351
Kraft-Eindringtiefe-Messung 213
Kraftrücknahmekurve 215
Kratzstab 278
Kratztest 277, 278
Kreiden 330
Kriech Eigenschaften 211
kristalline Strukturen 46
Kunststoffformenstähle 12
- L**
- Lambert-Beer-Gesetz 182
laminare Strömung 104
Laser 161
Lasermikroskopie 143
Laserstrahl 143, 231
– Verdampfen mittels 43
Lastenheft 5
Lebensdauer 291
Leerstelle 183
Lichtbogen
– Verdampfen mittels 43
Lichtgeschwindigkeit 167
Lichtintensitätsverteilung 148
Lichtquelle 161
Lichtwellen 160
Liganden 83, 93
Linienmessung 159
Linienspektrum 184
Lochblende 143
Lochkorrosion 301
Löslichkeit 47, 84
Losrißkraft 239, 339
Lösungsdruck 300
Lösungsmittel 56, 58, 84, 249, 260
- M**
- Magnetronspütern 45
Maraging-Werkzeugstähle 19
Masse-Ladungs-Verhältnis 253
Massenflussregler 59
Massenschwächungskoeffizienten 183
Massenspektrometrie 248, 252
Massenspektrum 252, 253, 254
Massetemperatur 313, 332
Materialabbau 256
Materialabtrag 268
Materialidentifizierung 169
Materialtrocknung 257

Materialversagen 275
Matrixmaterial 35
matte Stellen 2
mechanische Adhäsion 339
Mehrkomponentensysteme 82
mehrlagige Schichtsysteme 50
Messgeschwindigkeit 165
Messgröße 348
Messstrecke 158
Metallgitter 49
metallische Bindung 49
Metallkorrosion 198
metallorganische chemische Gasphasen-
abscheidung 53, 305, 311, 321
Metallprobe 206
Michelson-Interferometer 161, 175
Mikrobrechen 269
mikrophysikalische Effekte 214
Mikroröntgenfluoreszenzanalyse 190
Mikrospanen 269
Mikrostrukturen 215, 304
Mikrowelle 75
Mischelemente 70
Mitlaufprobe 277
Mittenrauwert 158
mittlere freie Weglänge 43
mittlerer Infrarotbereich 166
MOCVD 54
MOCVD-Anlage 59
Modellbildung 99
molekulare Vorstufen 78
Moleküleigenschaften 79
Molekülschwingungen 168
Morphologie 79
MS-Signalintensität 264
Multilagenschicht 321
Multi-Source-Precursor 82

N

naher Infrarotbereich 166
Nanoindentation 209
Nanolayerschichten 50
Nanotechnologie 163
Nasskorrosion 300

Navier-Stokes-Gleichungen 104
Nebenprodukte 80
Nebenreaktion 55
Neigungswinkel 338
nichtwässrige Korrosion 303
Niederfrequenz 205
Niederschlag 256
niedriglegierte Werkzeugstähle 18
Niedrigvakuum-REM 124
Nitrieren 22
Normalschwingungen 168
numerische Apertur 122
Nyquist-Diagramm 199, 202

O

Oberflächenbeschaffenheit 192
Oberflächenenergie 340
Oberflächenfehler 367
Oberflächengeometrie 304
Oberflächengüte 271
Oberflächenmodifikation 241
oberflächennahe Beheizung 368
Oberflächennormale 281
Oberflächenprofil 160
Oberflächenqualität 351
Oberflächenrauheit 116, 134, 215, 223,
245, 272, 339, 341
Oberflächenstruktur 149, 238, 283, 345
Oberflächenzerrüttung 269
Ohmscher Widerstand 194
Opferanode 303
Ordnungszahl 126
organische Moleküle 178
organische Verbindungen 253
Oxidation 369
Oxidationsreaktion 193
Oxidschicht 192, 303

P

Paarbildung 182
PACVD 75, 296
Pendelschwingungen 168
Permittivität 203

- Pflichtenheft 5
Phasenumwandlung 304, 316
Phasenverschiebung 194, 196
Photoeffekt 182
Photon 128, 182
physikalische Adhäsionskräfte 340
physikalische Bindung 49
physikalische Gasphasen-
abscheidung 41, 283, 296, 308, 311,
320, 342, 356, 359, 369
piezoelektrischer Effekt 351
Pinhole 356
plasmabasierte chemische Gasphasenab-
scheidung 74
Plasmanitrieren 299
Plasmen 74
Plastifizierparameter 333
Plastifizierung 257
plastische Eigenschaften 222
plastische Verformung 211, 221
plastische Verformungsarbeit 220
Plate-out-Effekt 329
Polarisationswiderstand 192
Pop-in-Verhalten 214
Porenfüllung 193
Porenwiderstand 203
Postprocessor 99
Potentiostat 205
Präparation 122
Precursoren 53, 58, 62, 65, 78, 285, 318
– feste 71, 72
– flüssige 58
– kommerziell erhältlich 84
Preprocessor 99
Primärelektronen 126
Primärintensität 183
Probendicke 186
Probenoberfläche 233
Probenpräparation 170, 186
Probenzuführung 249
Produktidentifizierung 36
Profil
– topologisches 134
Prozessdruck 60
Prozessemissionen 258
Prozessparameter 87
Prozesstemperatur 67, 75
Prüfkraft 211, 224
Prüfoberfläche 241
Pull-off Scherfestigkeitstest 277
pulvermetallurgische Werkzeugstähle
12, 19
Pulverpartikel 65
PVD 41
– Verfahrensvarianten 41
PVD-Beschichtung 22
Pyrolyse 65
- Q**
- Quantifizierung von Komponenten 174
Querschlifffmethode 277, 281
- R**
- Randles Cell 200
Rasterelektronenmikroskop 122, 308
Rauhe Oberfläche 3
Rauheit 157, 159, 164, 321
– des Substrates 48
Rauheitsänderung 273
Rauheitsmessung 153
Rautiefe 158
Rautiefenprofil 281
Rayleighstreuung 182
Reaktand 78
Reaktion
– chemische 55
Reaktionsprodukte 65, 255, 303
Reaktivität 79
Reaktor 53
Reaktortemperatur 65
Reaktortyp 58
Reduktion der Reibung 291
Reduktion des Belages 335
Referenzelektrode 205
Reflexionseigenschaften 162
Reflexion von Licht 156
Reibbeiwert 341
Reibkraft 342

- Reibpartner 239, 243
Reibung 291
Reibungsreduktion 291
Reibungsverhalten 296
Reibverhalten 35
Reibwerterhöhende Schichten 36
Reibzustände 346
Reinheit 181
Reinigungsritzel 71
Relaxationsvorgang 220
REM 124
Resistiv beheizte Oberfläche 368
Resonanzfrequenz 168
Restfeuchte 330
Retentionszeit 250, 251, 260
RFA 181
Risse 281, 309
Risskorrosion 301
Rissnetzwerk 150
Rissstruktur 292
Rockwellhärte 209, 210
Rockwell-Härteprüfung 287
Rockwell-Test 277, 279
Röntgenanalyse 181
Röntgendiffraktometrie 190
Röntgenfluoreszenzanalyse 181
Röntgenstrahlen 124, 128
Röntgenstrahlung 182, 184, 185
rückgestreute Elektronen 124
Rückstreuелеktronen 126, 133
- S**
- Sättigung des Trägergases 66
Sättigungsdampfdruck 68
Sauerstoffgehalt 303
Säulenkopf 249
Schallplatteneffekt 3
Schattenmaske 357
Schäumen 333
Scherfestigkeitstest 279
Schichtabscheidung 53
Schichtaufbau 309, 321
Schichtbestandteile 188
Schichtcharakterisierung 115
Schichtdicke 61, 116, 183, 185, 188, 189,
203, 284, 304, 308, 309, 311, 321
– PVD 41
Schichtgrenzen 50
Schichthaftung 53, 281, 286
Schichthärte 284
Schichtstruktur 65
Schichtsysteme 50, 284, 305
Schichtversagen 309
Schichtwachstum 41, 46, 55
Schichtwachstumsrate
– Simulation 105
Schichtzonenmodell 48
Schmelzefront 350
Schmelztemperatur 319
Schmiermittel 330
Schneckengröße 333
Schneckenzuführung 70
Schnellarbeitsstähle 11, 18
Schrittweite 145
Schutzschicht 192
Schwindung 241
Schwingungsformen im Molekülen 168
Schwingungsspektrum 173
Scratchtest 277, 279
Scratchtester 287
SE 124
Seebeck-Effekt 354
Sekundärelektronen 124, 126, 131
Sensorcharakterisierung 360
Sensorkalibrierung 360
Sensoroberfläche 364
Sensorschicht 36
Sensorträgheit 349
SE-Sensor 130
Siegelpunkt 350
Simulation der Schichtabscheidung 99
Single-Source-Precursoren 83
Solver 99
Solvothermale Reaktion 90
Spaltgängigkeit 59, 305
Spaltinnenwand 62
Spannungsanregung 306
Spektralbereich 166
Spektrenauswertung 179

- Spektrometer 176
 spezialisierte Werkzeugstähle 20
 spezifische Adhäsion 339
 spezifischer Widerstand 369
 spezifische Wärmekapazität 230
 Spitzenverrundung 222
 Splitverhältnis 249
 Spreizschwingungen 168
 Sprudler 68
 Spurenanalytik 175
 Sputtern 44
 Standardwasserstoffelektrode 205
 Stoffgemisch 249
 Stofftransport innerhalb des
 Reaktors 66
 stoßfeste Werkzeugstähle 11
 Stranski-Krastanov-Modell 47
 Strategien in der Materialsynthese 81
 Stromantwort 195
 Stromdichtepotentialmessung 305
 Strömungssimulation 99
 Strömungsverhalten 101
 Strömungsweg 107
 Strukturierte Oberfläche 321
 Sublimationsdruck 47
 Sublimationstemperatur 86
 Substrat 41, 118, 284
 Substratoberfläche 55, 65, 77
- T**
- Target 44
 teilkristalline Thermoplaste 349
 Temperaturabfall 233
 Temperaturamplitude 232
 Temperaturänderung 233
 Temperaturausgleich 234
 Temperaturleitfähigkeit von
 Beschichtungen 228
 Temperaturmessung 364
 Temperaturschwankungen 280
 temperatursensitive Dünnschichten 354
 Temperatursensor 348, 351, 355
 Temperaturverlauf 353
 Tempern 257
 Tetraethylorthosilikat 57
 thermische Ausdehnung 316
 thermische Barrierschicht 313, 316,
 319, 321
 thermische CVD 53
 thermische Eigenschaften 305
 thermische Leitfähigkeit 232, 321
 thermischer Ausdehnungskoeffizient 319
 thermisch isolierende Werkstoffe 228
 Thermodesorptionsröhrchen 261,
 262, 264
 thermodynamische Adhäsions-
 theorie 341
 Thermoelemente 349, 353, 355,
 357, 360
 Thermoschock 277
 Thermoschocktest 280
 Tiefenschärfe 125
 Tigerlines 2
 Time Domain Thermoreflectance 230
 Topcoat 294
 Topografie 150
 topografische Darstellung 147
 topografisches Bild 144
 Torsionsschwingungen 168
 Trägergas 250, 251
 Trägergasstrom 54
 Trennmittel 330, 342
 Trennschärfe 251
 Trennverhalten 251
 tribologischer Zustand 243
 tribologische Schichten 290
 Tribooxidation 291
 Trockenkorrosion 300
- U**
- Ultra-Variable-Pressure-Detektor 131
 Unebenheiten 157
 unvollständig gefüllte Formteile 4
 UVD-Sensor 131

V

Vakuumpumpe 55
Valenzschwingungen 168, 172
Verarbeitung 257
Verbundwerte 223
Verdampfer 54
Verdampfungstemperatur 42
Verformungen 211, 212, 281
Vergleich des Infrarotspektrums 171
Vergleichsstelle 354
Verklumpen 70
Vernickeln 34, 294
Versagen der Beschichtung 309
Verschleiß 267, 271, 274, 275, 283, 288
Verschleißbeinsatz 272
Verschleißermittlung 273
Verschleißerscheinungen 164
verschleißfest 296
Verschleißfestigkeit 16, 119, 286, 292
Verschleißprüfung 154
Verschleißrate 120
Verschleißschutzschichten 41, 290
Verschleißtopf-Prüfstand 269
Verschleißuntersuchung 267
Verschleißverhalten 271
Verschleißvolumen 119
Verwirbelung des Pulvers 70
Vickershärte 209, 210
Vollmaterial 221
Volmer-Weber-Modell 47
Vorbehandlung des Substrates 49
Vorbereitung der Probe 129
Vorläuferverbindung 53
Vorlauftemperatur 228, 353, 364
Vortrocknung 257

W

Wanddicke 272, 323
Warburg-Impedanz 198
Warmarbeitsstähle 11, 18
Wärmeableitung 361
Wärmebehandlung 20
Wärmeeindringfähigkeit 317

Wärmeeindringkoeffizient 230, 235
Wärmeerzeugung 369
Wärmeisolationsschicht 233
Wärmeleitfähigkeit 17, 230, 233, 313
Wärmeleitfähigkeitsdetektor 251
Wärmeleitung
– dünner Schichten 230
Wärmeschockbeständigkeit 316
Wärmeübertragungsanalyse 111
Wärmezufuhr 353
Wartung 23
Wasseraufnahme 198
Wasserstoffbrücke 340
Wasserstoffversprödung 32
wässrige Korrosion 192, 310
Wechselstrom 194
Wechselstromkreis 196
Wechselwirkung 160, 181
Wechselwirkungsquerschnitt 182
Weglänge
– mittlere freie 43
Weißbruch 4
Weißlichtinterferometer 272
Weißlichtinterferometrie 156, 160
Wellenlänge 167
Wellenlänge des Laserlichts 144
wellenlängendispersive RFA 185
Wellenzüge pro Zentimeter 167
Welligkeit 157
Werkstoffhärte 269
Werkzeugbelag 178
Werkzeugbeschichtung 345
Werkzeuginnendruck 348
Werkzeuginnendruckverlauf 349
Werkzeugoberfläche 241, 289, 344, 367
Werkzeugstahl 9
Werkzeugtemperatur 367
Werkzeugtemperierung 364
Werkzeugwand 352, 361, 364
Werkzeugwandtemperatur 228, 313, 317,
344, 348, 361, 364
Werkzeugwandtemperaturverlauf 352
Werkzeug zur Emissionsaufnahme 262
Widerstand
– elektrischer 192, 231

Z

- Zähigkeit *16*
- Z-Ebenen *146*
- Zeitverschiebung *195*
- Zersetzung *56*
- Zersetzungstemperatur *92*
- Zusammensetzung *181, 186*
- Zustandsgleichungen *104*
- Zwischenschicht *50*
- Zykluszeit *228*