

Werkstoffe für Wellenfedern

Der Werkstoff als Kriterium für die anwendungsgerechte
Auswahl von Wellenfedern aus gewalztem Flachdraht

Whitepaper

Bochum 2020

Inhalt

1. Wellenfedern - Innovative Federntechnik für leistungsfähige Baugruppen	3
2. Der Werkstoff als Entscheidungsfaktor	5
3. Auswahlfaktor Korrosionsbeständigkeit	7
4. Auswahlfaktor Temperaturbeständigkeit	10
5. Auswahlfaktor Umgebungssituation	15
6. Auswahlfaktor Magnetismus und elektrische Leitfähigkeit	19
7. Auswahlfaktor Biokompatibilität (Medizintechnik)	22
8. Auswahlfaktor Lieferzeit (Verfügbarkeit)	24
9. Auswahlfaktoren Lebensdauer und Kosteneffizienz	26
10. Die sechs verschiedenen Typen von Wellenfedern	27
11. Das No-Tooling-Verfahren von Smalley	31
12. TFC und Smalley - Ihre Partner für Qualität und Sicherheit	32

1. Innovative Federntechnik für leistungsfähige Baugruppen

Bei gleichem Federweg und gleicher Belastbarkeit beanspruchen die Wellenfedern von Smalley® im Sortiment von TFC dank ihrer speziellen Geometrie bis zu 50 Prozent weniger axialen Bauraum als konventionelle Runddraht- und Spiralfedern. Dank ihrer reduzierten Arbeitshöhe lassen sie sich in kleineren Federräumen verbauen. Die dadurch erreichte Verkleinerung einer Baugruppe sowie der geringere Materialeinsatz bei der Herstellung der Federn können zu einer Reduktion der Gesamtkosten einer Konstruktion führen.



Wellenfedern von TFC beanspruchen bis zu 50 Prozent weniger axialen Bauraum als konventionelle Runddraht- und Spiralfedern

Wellenfedern nehmen Lasten auf, gleichen Spiel aus und kompensieren funktionsbedingte Änderungen von Toleranzen in Baugruppen. Wellenfedern lassen sich mit nahezu allen Federkräften anfertigen sowie mit bzw. für graduelle(n) oder plötzliche(n) Kraftentwicklungen. Wellenfedern bieten eine genaue Federkonstante, bei der sich die Kraft proportional zum Federweg verhält.

Aufgrund einer glatten, kreisförmig gewickelten, sinusartigen Wellenform und gewalzten, runden Kanten aus vortemperiertem Ausgangsmaterial bieten die kantengewickelten Wellenfedern von Smalley® gegenüber gestanzten Federprodukten zahlreiche Vorteile. Die Belastbarkeiten und Toleranzen von Wellenfedern und ihren Federkonstanten sind genauer zu spezifizieren als es bei Stanzteilen der Fall ist. Die Federkraft einer Smalley®-Wellenfeder steigt über weite Teile ihres verfügbaren Dehnbereichs vollkommen gleichmäßig an.

Da die Wellenfedern von Smalley® aus massivem, gehärtetem und temperiertem Vormaterial bestehen, unterliegen sie keinem Verformungsrisiko während der weiteren Wärmebehandlung im Rahmen des Härtens. Bei gestanzten Wellenscheiben hingegen können im Rahmen nachfolgender Herstellungsprozesse Ermüdungsrisse, Ungenauigkeiten bei der Federkraft und andere Probleme auftreten. Mit anderen Worten: Die metallurgischen und mechanischen Eigenschaften sowie die hohe Maßhaltigkeit der kantengewickelten Wellenfedern von Smalley® und TFC ermöglichen die Umsetzung hoher Ansprüche an die konstruktive Präzision.

TFC bietet die Wellenfeder von Smalley® in sechs Grundtypen an:

- In einlagiger Ausführung mit Spalt oder überlappenden Enden

- Als Crest-to-Crest[®]-Wellenfeder mit durchgängig gewickelten Mehrfachwindungen
- Als 360°-geschlossene Crest-to-Crest[®]-Wellenfeder mit parallelen Enden
- Als Nested-Wellenfeder mit durchgehend angelegten Windungen
- Als WAVO[®]-Ausführung aus einfachem Runddraht mit Spalt
- Als stabförmige Linear-Wellenfeder



Die Wellenfedern von TFC/ Smalley liegen in vielen verschiedenen Ausführungen vor.

Detaillierte Produktinformationen zu den einzelnen Wellenfeder-Grundtypen siehe bitte Kapitel II ab Seite 27.

2. Der Werkstoff als Entscheidungsfaktor

Im Rahmen der anwendungsgerechten Auslegung und Auswahl von Wellenfedern ist die Frage nach dem optimalen Werkstoff stets von zentraler Bedeutung. Neben der Bestimmung der konstruktiven Parameter – etwa dem Bohrungs- bzw. Wellendurchmesser oder den Lastzuständen – ist sie von grundsätzlich hoher Relevanz für die kinematische Leistungsfähigkeit und die Lebensdauer einer Baugruppe. Da die Auswahl des bestgeeigneten Werkstoffs für eine Wellenfeder also einen maßgeblichen Beitrag für die Qualität einer ganzen Baugruppe leisten kann, sollte sie stets im Fokus der Ingenieure, der Konstrukteure und der technischen Beschaffer stehen. Insbesondere im Rahmen der Entwicklung neuer, innovativer – möglicherweise miniaturisierter – Produkt- und Systemlösungen fällt ihr eine wichtige Rolle zu.

Aus diesen Gründen hat TFC in diesem Whitepaper alle derzeit für die Herstellung von Smalley®-Wellenfedern relevanten Werkstoffe zusammengetragen. Es sind dies:

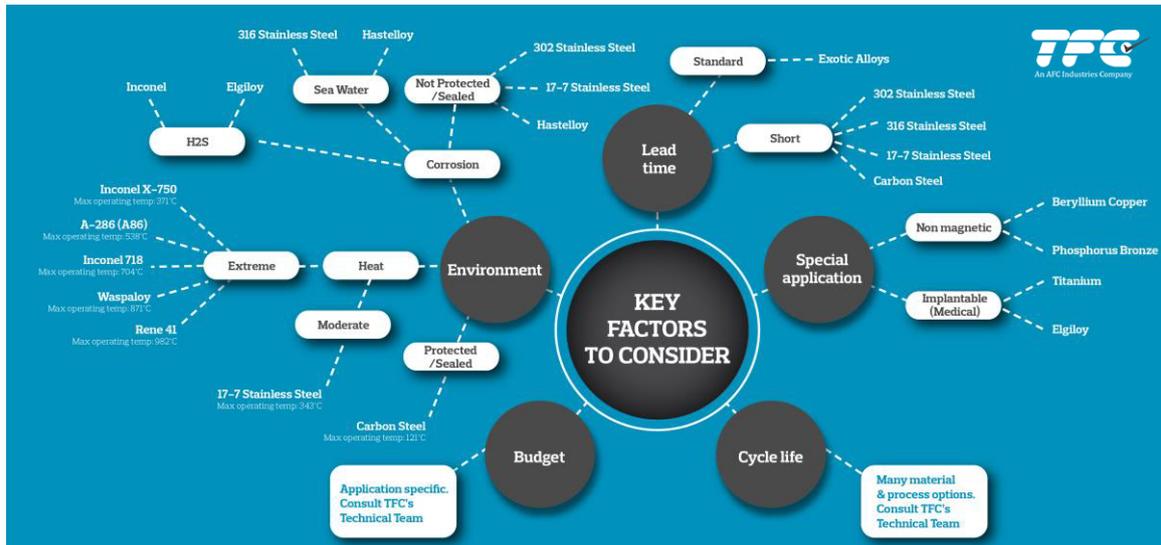
- Nichtrostender Edelstahl 1.4401
- Hastelloy® C-276
- Inconel®
- Nichtrostender Edelstahl 17-7 PH
- Inconel® X-750
- Incoloy® Alloy A-286
- Waspaloy®
- Rene 41®
- Kohlenstoffstahl/Federstahl SAE 1070 - 1090
- Kupferberyllium Legierung 25 (Beryllium Copper)
- Phosphorbronze Güteklasse A
- Titan

Die einzelnen Wellenfeder-Werkstoffe werden im Folgenden mit ihren EN-Werkstoffnummern sowie vereinzelt auch mit den UNS-Werkstoffnummern des englischen Unified Numbering System for Metals and Alloys und/ oder den AISI-Werkstoffkennungen des American Iron and Steel Institute und/ oder den im Stahlhandel bekannten Markennamen der Hersteller aufgeführt. Zur Vervollständigung werden an einigen Stellen auch die Aerospace Material Specification (AMS) und die SAE-Bezeichnung der amerikanischen Society of Automotive Engineers) genannt.

In diesem Whitepaper werden die genannten Werkstoffe jeweils in Beziehung gesetzt zu den wichtigsten Faktoren für die anwendungsgerechte Auswahl und Herstellung von Wellenfedern. Diese Faktoren sind:

- Korrosion
- Temperatur
- Umgebungssituation
- Lieferzeit (Verfügbarkeit)
- Magnetismus und elektrische Leitfähigkeit
- Biokompatibilität
- Lebensdauer (Standzeit)
- Kosteneffizienz

Da sich dieses Whitepaper vorrangig an Konstrukteure, Produktentwickler und Technische Einkäufer wendet, bleiben die Aspekte der Gewinnung, Vergütung und Bearbeitung der vorgestellten Werkstoffe weitgehend unberücksichtigt. Zudem verfolgt dieses Whitepaper das Ziel, den Anwendern der Wellenfeder eine erste Orientierung im Rahmen ihrer Entscheidungsfindung zu bieten. Eine qualifizierte Beratung durch die Wellenfeder-Spezialisten von TFC kann es daher nicht ersetzen.



Schematische Übersicht über die Schlüsselfaktoren bei der Auswahl der Werkstoffe für Wellenfeder.

Hinweis in eigener Sache:

Die Entwicklung und Herstellung von Werkstoffen unterliegt ständigen Innovationsprozessen und grundsätzlichen Qualitätsschwankungen. Bitte berücksichtigen Sie daher, dass TFC keine absolute Gewähr für die Vollständigkeit, Genauigkeit und Aktualität der technischen Angaben in diesem Whitepaper übernehmen kann.

3. Auswahlfaktor Korrosionsbeständigkeit

3.1 Anwendungen in Meerwassertechnik sowie Chemietechnik und Lebensmitteltechnik

Nichtrostender Edelstahl 1.4401 (X5CrNiMo17-12-2) *EN-Werkstoffnummer 1.4401 - AISI-Systemnummer 316*

Der Rostfreie Edelstahl mit der EN-Werkstoffnummer 1.4401 ist ein silbergrauer Chrom-Nickel-Stahl mit Molybdänzusatz (2,0 bis 2,5 %). Es handelt sich hierbei um einen austenitischen V4A-Stahl. Er verfügt über eine gute Beständigkeit gegenüber Korrosion, die sich durch Polieren weiter optimieren lässt. Aufgrund des erhöhten Chromgehalts von 16,5 bis 18,5 % ist er korrosionsbeständiger als ein vergleichbarer Stahl mit einem 13-prozentigen Chromanteil.

Der Edelstahl 1.4401 zählt neben den Sorten 1.4404, 1.4521 und 1.4571 zu den am häufigsten genutzten Stahlwerkstoffen. Er eignet sich gut zur Herstellung von Wellenfedern für Produkte, die in natürlichen Umgebungen mit ländlicher und urbaner Atmosphäre sowie in Gewerbe- und Industriegebieten eingesetzt werden. Auch für Anwendungen in der Lebensmitteltechnik und im landwirtschaftlichen Nahrungsmittelsektor (z.B. Molkereien, Brauereien) ist er eine gute Wahl. Zu den großen Einsatzgebieten dieses Edelstahls gehört des Weiteren die Marinetechnik; er ist also für die Herstellung von Wellenfedern geeignet, die in Meerwasser-Anwendungen zum Einsatz kommen sollen.

Aufgrund seines hohen Chromgehaltes erweist sich der Edelstahl 1.4401 in Medien mit mäßiger Aggressivität und mit einer eher niedrigen Chlorid- und Salzkonzentration (z.B. Wasser, Wasserdampf, Luftfeuchtigkeit, schwache Säuren und Laugen) als gut korrosionsbeständig. In diesem Rahmen eignet er sich also beispielsweise zur Herstellung von Wellenfedern für den Einsatz in der Chemietechnik, der Zellstoff-Industrie sowie den Bereichen Farbe, Öl und Seife. Auch wenn Wellenfedern für Lager- und Transportsysteme für aggressive Güter benötigt werden, fällt die Wahl häufig auf diesen Werkstoff.

Darüber hinaus wird der Edelstahl 1.4401 bei der Herstellung von Komponenten für Trink-, Kühl- und Abwassersysteme eingesetzt. Weit verbreitet ist er zudem in der Automobilindustrie, in der Haushaltsindustrie sowie in der Textilveredelung. Weitere wichtige Einsatzgebiete für diese Stahlsorte sind Schwimmbadtechnik, Gebäudetechnik und Architektur.

Hastelloy® C-276 (NiMo16Cr15W) *EN-Werkstoffnummer 2.4819 – UNS-Systemnummer N10276*

Hastelloy® ist der Markenname einer Nickelbasis-Legierung des Herstellers Haynes International, Inc., die in mehreren Varianten zur Verfügung steht. Diese auch als Superlegierungen bezeichneten Edelstähle sind gegen zahlreiche aggressive Chemikalien beständig und gelten als sehr resistent gegenüber Korrosion. Für die Herstellung von Wellenfedern verwendet Smalley® vorrangig die Legierung Hastelloy® C-276. Hierbei

handelt es sich um eine Nickel-Molybdän-Chrom-Legierung mit Wolfram. Sie verfügt explizit über eine überaus hohe Korrosionsbeständigkeit.

Die Legierungen der Gruppe Hastelloy® C wurde ursprünglich als Werkstoff für Antriebsdüsen von Düsentriebwerken entwickelt. Ihre sehr gute Temperaturbeständigkeit führte im Laufe der Jahre aber auch zur Verwendung in vielen anderen Bereichen des Ingenieurwesens.

Diese Nickel-Chrom-Molybdän-Legierungen zeichnen sich – auch bei höheren Temperaturen – insbesondere durch eine hohe Beständigkeit gegen Spaltkorrosion, Lochkorrosion und Spannungsrisskorrosion in oxidierenden und reduzierenden Medien aus. Weiterhin erweist sich der Werkstoff als gut beständig gegen eine Vielzahl korrosiver Medien einschließlich starker Oxidationsmittel wie Eisen(III)-Chlorid und Kupfer(II)-Chlorid, Schwefelsäure, Salpetersäure, Phosphorsäure, Chlor (trocken), Ameisensäure und Essigsäure sowie heiße Medien. Darüber hinaus zeigt Hastelloy® C-276 eine gute Beständigkeit in feuchtem Chlorgas, Natriumchlorid und Chlordioxidlösungen.

Aus diesen Gründen eignet sich Wellenfedern aus Hastelloy® C-276 beispielweise sehr gut für den Einsatz in den Baugruppen der Anlagen, Apparate und Leitungssysteme der chemischen und pharmazeutischen Industrie oder auch in den Druckbehältersystemen von Kernkraftwerken.

Weitere typische Anwendungsbereiche für diese Superlegierung sind die Aufschluss- und Bleichbehälter der Papier- und Zellstoffindustrie, Wasch- und Rührwerke sowie nassgehende Ventilatoren in der Rauchgasentschwefelung, Komponenten für die Sauergasanwendung, Reaktoren für die Essigsäureproduktion, Schwefelsäure-Kühler sowie die Herstellung und Verarbeitung verunreinigter Phosphorsäure.

3.2 Anwendungen unter H₂S-Einfluss (Schwefelwasserstoff)

Inconel®

AMS-5699 (Spring Temper / No.1 Temper)

Inconel® ist ein geschützter Markenname der Firma Special Metals Corporation für eine Gruppe von korrosionsbeständigen Nickelbasislegierungen. Diese Edeltähle kommen vor allem für Hochtemperatur-Anwendungen zum Einsatz und haben Nickel als Hauptkomponente sowie Chrom als wichtigste Nebenkomponekte. Je nach Legierung können sie darüber hinaus Eisen, Molybdän, Niob, Kobalt, Mangan, Kupfer, Aluminium, Titan, Silizium, Kohlenstoff, Schwefel, Phosphor und Bor enthalten. Inconel® ist auch unter den Handelsnamen Chronin®, Altemp®, Haynes®, Nickelvacc® und Nicrofer® auf dem Markt zu finden.

Die Inconel®-Legierungen sind gut gegen Korrosion beständig, so dass sie sich zur Herstellung von Wellenfedern eignen, die in extremen Umgebungen zum Einsatz kommen sollen. Beim Erhitzen bilden die Stähle eine dicke, stabile Oxidschicht, die die Oberfläche schützt. Ihre Festigkeit ist über einen breiten Temperaturbereich stabil, weshalb die Legierungen insbesondere für solche Hochtemperaturanwendungen empfehlenswert sind, in denen Aluminium und andere Stähle instabil werden können.

Ein großes Inconel®-Anwendungsgebiet ist der Bau von Komponenten für chemische Reaktoren und Dampfkessel. Wellenfedern für den Einsatz im Kernreaktorbereich sowie in den Leitungs- und Ventilsystemen chemisch-pharmazeutischer Anlagen bestehen daher häufig aus Inconel®-Legierungen. Insbesondere im Rahmen der Verarbeitung von H₂S- und CO₂-haltigen Medien sind sie eine gute Wahl.

Weitere typische Einsatzbereiche für die Inconel®-Edelstähle sind beispielsweise die Herstellung von Verdichter- und Turbinenschaufeln oder Brennkammern in Gasturbinen. Auch für Turbolader und als Werkstoff für Auslassventile bei aufgeladenen Verbrennungsmotoren werden die Legierungen verwendet – aufgrund ihres hohen Preises kommen sie hier allerdings fast nur für High End-Anwendungen im Motorsport in Frage. Etwa in der Formel 1, wo unter anderem Auspuffkrümmer aus Inconel® gefertigt werden. Einige Bauteile des Airbus A380 wurden ebenfalls in einer der Inconel®-Legierungen ausgeführt.

Für die Herstellung von Wellenfedern verwendet Smalley® vorrangig die Inconel®-Legierungen Inconel® Alloy X-750 (in verschiedenen Federstahl-Varianten) sowie Inconel® Alloy 718.

Elgiloy® (CoCr20Ni16Mo7) AMS-5876

Elgiloy® ist ein eingetragenes Warenzeichen des Unternehmens Combined Metals of Chicago. Der Edelstahl gilt als Superlegierung und ist bekannt für seine hervorragende Beständigkeit gegen korrosive Umgebungen. Er eignet sich ebenfalls für die Herstellung von Wellenfedern für Anwendungsbereiche in denen erhöhte Temperaturen vorherrschen. Dabei kommen Elgiloy®-Edelstähle bevorzugt in der Ölindustrie zum Einsatz. Sie zeigen gegenüber anderen von der National Association of Corrosion Engineers (NACE) zugelassenen Werkstoffen eine höhere Zuverlässigkeit, wobei insbesondere die hohe Spannungsrissbeständigkeit in schwefelhaltigen Umgebungen erwähnenswert ist.

Ein Vergleich mit konventionellen Stählen unterstreicht die hohe Leistungsfähigkeit dieser eher selten angewendeten Superlegierung. So soll Elgiloy® bei einer Temperatur von 343° C (650 °F) beispielsweise eine über 600 Prozent bessere Lasthaltefähigkeit aufweisen als Rostfreier Edelstahl der Güte 17-7 PH. Des Weiteren bietet die Superlegierung mit über 100 Prozent mehr Zyklen eine deutlich höhere Beständigkeit gegenüber Materialermüdung und eine deutlich höhere Bruchbeständigkeit als Kohlenstoffstahl.

Elgiloy® ist nicht magnetisch und hat aufgrund der Wärmebehandlung eine blaubraune Färbung. Für die Herstellung von Wellenfedern verwendet Smalley® explizit die Elgiloy®-Legierung nach AMS-5876.

4. Auswahlfaktor Temperaturbeständigkeit

4.1 Anwendungen unter normalen (moderaten) Temperaturen

Nichtrostender Edelstahl 17-7 PH (X7CrNiAl17-7) *EN-Werkstoffnummer 1.4568 - AISI-Systemnummer 631*

Der Nichtrostende Edelstahl mit der EN-Werkstoffnummer 1.4568 ist im Markt auch geläufig unter der Herstellerbezeichnung 17-7 PH (Precipitation Hardening). Es handelt sich dabei um einen halbaustenitischen ausscheidungshärtenden Stahl von hoher Festigkeit und Härte, der sich durch hervorragende Ermüdungseigenschaften – also sehr gute Langzeit- und Dauerlauf-Eigenschaften – sowie eine gute Korrosionsbeständigkeit auszeichnet. Des Weiteren zeigt er bei der Wärmebehandlung eine nur minimale Verformung. Er gehört zu den Standardwerkstoffen zur Herstellung von Wellenfedern.

Der Nichtrostende Edelstahl 1.4568 wird im geglähten Zustand leicht geformt und dann durch Wärmebehandlungen auf sein hohes Festigkeitsniveau gebracht. Die außergewöhnlichen hohen Festigkeitseigenschaften im Zustand CH900, RH950 und TH1050 bietet viele Vorteile (allerdings mit Kompromissen hinsichtlich der Zähigkeit und Verarbeitbarkeit). Bei Anwendungen unter hoher Beanspruchung, bei denen der Faktor Materialermüdung eine große Rolle spielt, übertrifft der Edelstahl 1.4568 (17-7 PH) auch Kohlenstoffstähle von hoher Güte. Nach dem Aushärten zeigt der Werkstoff eine blaue, braune oder silberne Farbe.

Im ausgehärteten Zustand verfügt diese Legierung über hervorragende mechanische Eigenschaften bei Temperaturen von bis zu 480° C. Auch seine Federeigenschaften erhält dieser Stahl durch Ausscheidungshärten auf die Bedingung CH900. Daraus gefertigte Wellenfedern können Temperatur von bis zu 343° C (650° F) ausgesetzt werden.



Wellenfeder aus Nichtrostendem Edelstahl 17-7 / 1.4568

Die Korrosionsbeständigkeit des Edelstahls 1.4568 (17-7 PH) ist jener der härtbaren Chromtypen überlegen, in einigen Umgebungen entspricht sie in etwa jener austenitischer rostfreier Chrom-Nickel-Stähle. Die allgemeine Korrosionsbeständigkeit ist mit der von rostfreien Stählen des Typs 304 oder 302 vergleichbar.

Im Zustand CH900 zeigt der Edelstahl 1.4568 (17-7 PH) einen Magnetismus ähnlich jenem von Kohlenstoffstahl.

4.2 Anwendungen in der Hochtemperaturtechnik

Inconel® X-750 (NiCr15Fe7TiAlNb)

EN-Werkstoffnummer 2.4669 - UNS-Systemnummer N07750

Inconel® X-750 ist ein eingetragenes Warenzeichen des Unternehmens Special Metals Corporation. Die Superlegierung wird mitunter auch unter den Handelsnamen Nicrofer® 7016 TiNb, Superimphy® 750, Haynes® X750, Pyromet® X750, Nickelvac® X750, Nicorros® 7016, Altemp® X-750 und Udimet® X750 angeboten. Es handelt sich dabei um eine ausscheidungshärtbare Nickel-Chrom-Legierung mit Aluminium- und Titanzusatz. Sie ist prädestiniert für Wellenfeder-Anwendungen, die eine Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit bei Temperaturen von bis etwa 980°C (1.800°F) sowie eine hohe Festigkeit bei Temperaturen von bis zu etwa 700°C (1.300°F) erfordern.

Inconel® X-750 kommt häufig für Hochtemperaturanwendungen zum Einsatz, erreicht dabei aber nicht ganz die Festigkeit von Nimonic® 90, einer anderen thermisch hoch beanspruchbaren Nickel-Chrom-Kobalt-Legierung. In petrochemischen Anwendungen verfügt Inconel® X-750 über eine ausgezeichnete Fähigkeit, Spannungskorrosionsrisse zu widerstehen. Aus Inconel®-Qualität hergestellte Wellenfedern (und Sicherungsringe) haben eine blau-silbergraue Farbe und weisen keinen Magnetismus auf.



Wellenfedern aus Inconel® X-750

Für die Herstellung von Wellenfedern verwendet Smalley vorrangig zwei allgemein spezifizierte Varianten von Inconel, die sich durch ihre Wärmebehandlung unterscheiden. Es handelt sich hierbei um Spring Temper und Nr.1 Temper. Im häufigsten Fall wird Inconel® X-750 ausscheidungsgeglüht, um die Federhärtung zu erhalten. In diesem Zustand hat der Werkstoff einen Temperaturwiderstand von bis zu 371 °C (700 °F). Die National Association of Corrosion Engineers (NACE) genehmigt den auf diese Weise gehärteten Edelstahl gemäß Spezifikation MR0175 (Rc50 Maximum) für die Herstellung spiralförmiger Sicherungsringe und Wellenfedern.

Die Ausführung Temper Nr. I wird einer längeren Wärmebehandlung unterzogen als Spring-Temper. Sie verfügt zwar über eine geringere Zugfestigkeit, bietet dafür aber eine höhere Temperaturbeständigkeit von bis zu 537 °C (1.000 °F).

Sowohl Inconel® X-750 Spring Temper als auch Inconel® X-750 Temper Nr. I können in normaler Luftumgebung und unter einer kontrollierten Atmosphäre im Ofen wärmebehandelt werden. Eine Wärmebehandlung in normaler Luft kann zu einer Oxidation führen, was einen schwarzen Rückstand hinterlässt; die Wärmebehandlung unter einer kontrollierten Atmosphäre hinterlässt keine Rückstände.

Aus Inconel® X-750 gefertigte Wellenfedern weisen eine blaue-silbergraue Färbung auf und sind nicht magnetisch.

Incoloy® Alloy A-286 (X6NiCrTiMoVB25-15-2)
EN-Werkstoffnummer 1.4980 - AISI-Systemnummer 660

Incoloy® A-286 – auch bekannt unter dem Handelsnamen Pyromet® Alloy A-286 – ist eine austenitische Eisen-Nickel-Chrom-Legierung mit Molybdän- und Titanzusatz. Sie lässt sich zur Optimierung der mechanischen Eigenschaften – also auch der Federeigenschaften – ebenfalls einer Ausscheidungshärtung unterziehen. Die Superlegierung behält ihre gute Festigkeit und Oxidationsbeständigkeit bei Temperaturen bis etwa 700°C. Sie zeigt hier eine exzellente Warmfestigkeit.

Insbesondere bei Wellenfeder-Anwendungen im Temperaturbereich bis etwa 537° C (1000° F) zeigt dieser Edelstahl ähnliche Eigenschaften wie Inconel® X-750. Er lässt sich zudem ähnlich wärmebehandeln wie die Superlegierungen Inconel® X-750 Spring Temper und Inconel® X-750 Nr. I Temper (siehe oben).

Dank seiner hohen Temperaturfestigkeit und seiner hervorragenden Verarbeitungseigenschaften kommt dieser Edelstahl unter anderem bei der Herstellung von Baugruppen und Komponenten für Flugzeugtriebwerke und Industriegasturbinen zum Einsatz. Zudem findet die Legierung Anwendung bei der Fertigung von Wellenfedern für jene Bereiche im Motoren- und Getriebebau, die im Betrieb hohen Temperaturen und Lasten ausgesetzt sind. Ein weiteres Einsatzgebiet ist die Öl- und Gas-Offshore-Technik.

Dieser Werkstoff weist keinen Magnetismus auf und hat eine blau-silbergraue Färbung.

Inconel 718 (NiCr19NbMo)
EN-Werkstoffnummer 2.4668 - UNS-Systemnummer N07718 - AMS-5596

Die Superlegierung Inconel® 718 ist eine aushärtbare Nickel-Chrom-Legierung, die neben einem geringfügigen Aluminium- und Titangehalt größere Mengen an Eisen, Niob und Molybdän enthält. Sie ist im Markt auch bekannt als Nicrofer® 5219, Superimphy® 718, Haynes® 718, Pyromet® 718, Supermet® 718 und Udimet® 718. Die Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit von Inconel® 718 gelten als sehr gut.

Inconel® 718 weist eine hervorragende Schweißbarkeit auf, was seine Verarbeitung erleichtert. Der Werkstoff zeigt sich gegen Rissbildung nach dem Schweißen beständig. In Wellenfeder-Anwendungen überzeugt Inconel® 718 durch seine hohe Festigkeit, seine

ausgezeichnete Zeitstandfestigkeit und seine hohe Ermüdungsresistenz in Baugruppen, die unter hohen Temperaturen von bis zu 700 °C (1.290 °F) arbeiten.

Wegen seiner Hochtemperaturfestigkeit und seiner exzellenten Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit kommt Inconel 718 für viele anspruchsvolle Anwendungen zum Einsatz. Entwickelt wurde der Werkstoff für den Einsatz in Komponenten für Flugzeugtriebwerke sowie Gehäuse, Befestigungselemente und Turbinenscheiben. Häufig findet er dort Anwendung, wo insbesondere hohe Anforderungen an die Kriechfestigkeit und das Ermüdungsverhalten von Werkstoffen bestehen.

Aufgrund seiner Eigenschaften sowie auch seiner guten Verarbeitbarkeit und Wirtschaftlichkeit wird der Werkstoff außerdem für die Herstellung statischer und rotierender Bauteile und Baugruppen in stationären Gasturbinen, Raketentriebwerken und Raumfahrzeugen, Kraftfahrzeug-Turboladern und Pumpen genutzt. Neben Wellenfedern bestehen auch viele andere C-Teile in diesen Bereichen aus Inconel® 718. Des Weiteren wird der Edelstahl auch zur Herstellung warmfester Werkzeuge verwendet. Innerhalb dieser Anwendungsbereiche ist Inconel® 718 häufig auch der prädestinierte Werkstoff für die Herstellung von Wellenfedern.

Inconel® 718 verfügt über eine höhere Festigkeit als Inconel® X-750 und bessere mechanische Eigenschaften bei niedrigeren Temperaturen als Nimonic® 90 und Inconel® X-750.

Waspaloy® (NiCrCoMoTiAl)

EN-Werkstoffnummer 2.4654 – UNS-Systemnummer N07001

Waspaloy® ist eine eingetragene Marke der United Technologies Corporation und ist auch unter der Bezeichnung Alloy 685 bekannt. Auch bei Waspaloy® handelt es sich um eine aushärtbare austenitische Nickelbasis-Superlegierung. Sie verfügt über sehr gute Festigkeitseigenschaften bei hohen Temperaturen von bis zu 870 °C (1.598 °F) und ist daher ein typischer Werkstoff für anspruchsvolle Hochtemperaturanwendungen. Insbesondere kommt der Werkstoff beim Bau von Gasturbinen zum Einsatz. Die Festigkeit ist mit der von Rene 41 (siehe unten) vergleichbar und im allgemeinen höher als jene von Inconel 718 (siehe oben).

Des weiteren bietet Waspaloy® eine gute Korrosionsbeständigkeit sowie eine hohe Oxidationsbeständigkeit bei Temperaturen von bis 1.000 °C (1.832 °F). Daher eignet sich dieser Edelstahl auch für die Herstellung von Wellenfedern, die in thermisch extrem belasteten Umgebungen zum Einsatz kommen sollen.

Zum Vergleich: Bei Temperaturen von über 620 - 650 °C ist die Zeitstandfestigkeit von Waspaloy® besser als jene von Inconel® 718. Die kurzzeitige Warmzugfestigkeit bei Temperaturen bis zu 730 °C übertrifft jene von Inconel® 718.

Waspaloy® liegt in verschiedenen Spezifikationen (AMS 5704, 5706, 5707, 5708, 5709) vor.

Rene 41[®] (NiCrCoMoTiAl)

EN-Werkstoffnummer 2.4973 – UNS-Systemnummer N07041

Rene 41[®] ist eine ausscheidungshärtbare Nickel-Chrom-Superlegierung für Hochtemperaturanwendungen, die von General Electric entwickelt wurde. Sie ist auch als Haynes[®] R-41, Pyromet[®] 41 und Udimet[®] R41 bekannt.

Rene 41[®] zeichnet sich durch eine sehr hohe Festigkeit bei hohen Temperaturen insbesondere im Bereich zwischen 650 °C und 980 °C (1.200 °F - 1.800 °F) aus. Erreicht wird diese Hochtemperaturbeständigkeit durch die Zugabe maßgeblicher Mengen an Kobalt und Molybdän. Spezielle mechanische Eigenschaften können durch verschiedene Kombinationen von Kaltarbeit und Wärmebehandlung eingestellt werden. Der Werkstoff verfügt außerdem über eine gute Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit.

Rene 41[®] ist insbesondere auch für dynamische Hochtemperatur-Kinematiken geeignet. Typische Einsatzbereiche sind etwa die Herstellung von Bauteilen und Baugruppen für Nachbrennsysteme und Turbinen für den Einsatz in der Luft- und Raumfahrt. Innerhalb dieser Anwendungsbereiche kommt Rene 41[®] auch als Werkstoff für die Fertigung von Wellenfedern infrage.

5. Auswahlfaktor Umgebungssituation

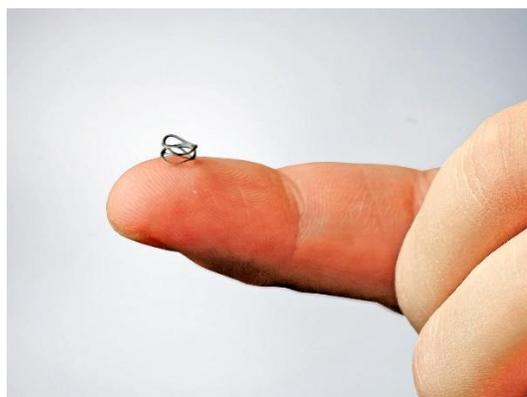
5.1 Geschützte Umgebung

Von einer geschützten Umgebung sprechen die Werkstoffexperten von TFC, wenn sich die verbaute Wellenfeder während des Betriebs in einem geschlossenen, abgedichteten oder versiegelten Raum befindet. Die Wellenfeder ist in diesem Fall also durch ihre unmittelbare Umgebung vor korrosiven oder thermischen Einflüssen geschützt. Unter diesen konstruktiven Bedingungen kann es ausreichen, Wellenfedern aus nicht korrosionsbeständigem Kohlenstoffstahl/ Federstahl einzusetzen.

Kohlenstoffstahl/Federstahl (XC67 - XC75) *EN-Werkstoffnummern 1.1231 - 1.1248 / SAE 1070 -1090*

Als Kohlenstoffstahl (auch Karbonstahl) bezeichnet man Stahl, der neben seinem Hauptbestandteil Eisen als Nebenbestandteil hauptsächlich Kohlenstoff (C) enthält. Er wird im Markt deshalb häufig auch als C-Stahl aufgeführt. Es handelt sich dabei grundsätzlich um härt- und schmiedbaren Stahl. Der Kohlenstoffgehalt kann bis zu 2,1 % betragen. Obgleich Kohlenstoffstahl leicht rostet und mit anderen Medien und Stoffen reagiert, weist er für die Herstellung vieler Produkte erhebliche Vorteile gegenüber rostfreien Stählen auf. So ist er beispielsweise härter; abhängig vom Kohlenstoffanteil bis ungefähr 65 HRC (Rockwell-Skala). Er kann zudem dünner ausgeschmiedet und gut geschärft werden.

Durch ein Polieren der Oberfläche lässt sich auch bei Kohlenstoffstahl die Korrosionsanfälligkeit reduzieren. Beispielsweise Saure Lebensmittel führen jedoch zum Anlaufen des Stahles. Durch eine Oberflächenbehandlung mit Ölen lässt sich die Korrosionsanfälligkeit ebenfalls verzögern oder vermeiden.



Sehr kleine Wellenfeder aus Kohlenstoffstahl

Smalley verwendet für die Herstellung seiner Wellenfedern eine Reihe von Kohlenstoffstählen, die aufgrund ihrer Eigenschaften auch als klassische Federstähle gelten. Sie eignen sich für Einsatztemperaturen von bis 121° C (249° F). Es sind dies:

Federstahl, ölgelutet (SAE 1070-1090)

Der Werkstoff SAE 1070-1090 ist ein gehärteter Federstahl mit hohem Kohlenstoffgehalt und gilt als Standardlösung für die Herstellung von Wellenfedern und spiralförmigen Sicherungsringen. Seine Zugfestigkeit und Streckgrenze werden hier durch eine Wärmebehandlung im Ölbad maximiert. Hierbei wird das Martensitgefüge des Stahls optimiert.

Federstahl, kaltgezogen (SAE 1060-1075)

Der Werkstoff SAE 1060-1075 ist ein kaltgezogener, vergüteter Federstahl mit hohem Kohlenstoffgehalt und gilt ebenfalls als Standardlösung für die Herstellung von Wellenfedern und spiralförmigen Sicherungsringen. Seine maximale Zug- und Scherfestigkeit erreicht diese Güte durch den Prozess des Kaltziehens.

In beiden Fällen eignet sich diese Kohlenstoffstähle vorrangig für Wellenfeder-Anwendungen mit einer geschützten Umgebung, da sie korrodieren, sobald sie nicht geschmiert oder atmosphärisch abgedichtet sind. Diese Federstähle werden also am besten dort eingesetzt, wo kein Kontakt mit ätzenden Medien möglich ist oder ihre Oberflächen durch einen Schmierfilm vor der umgebenen Atmosphäre geschützt werden. Ein wirksamerer Korrosionsschutz kann durch zusätzliche Oberflächenbehandlungen erreicht werden. Für den Werterhalt bei Transport und Lagerung wird empfohlen, Wellenfedern aus Federstahl mit einem Öl-Finish versehen zu lassen.

Federstahl ist sehr magnetisch und kann unterschiedliche Färbungen aufweisen; unter anderem blau, schwarz und grau.

5.2 Ungeschützte Umgebung

Von einer ungeschützten Umgebung sprechen die Werkstoffexperten von TFC, wenn die verbaute Wellenfeder während der Anwendung nicht von einem geschlossenen, abgedichteten oder versiegelten Raum umgeben ist. Die Wellenfeder befindet sich in diesem Fall also in unmittelbarem Kontakt mit korrosionsauslösenden Medien wie etwa Wasser. Explizit nicht gemeint sind an dieser Stelle H₂S- oder Meerwasser-Anwendungen.

Nichtrostender Edelstahl (X5CrNi18-8)

EN-Werkstoffnummer 1.4310 - AISI-Systemnummer 302

Der austenitische Chrom-Nickel-Stahl mit der EN-Werkstoffnummer 1.4310 zählt aufgrund seiner allgemein guten physikalischen Eigenschaften zu den Standard-Werkstoffen für die Herstellung und Auswahl der Wellenfedern (und spiralförmigen Sicherungsringe) von TFC/ Smalley®. Wegen des geringen Kohlenstoffgehalts erweist sich dieser silbergraue Stahl als relativ gut beständig gegen interkristalline Korrosion. Allerdings erreicht er nicht die hohe Korrosionsbeständigkeit anderer austenitischer

Stähle. Wellenfedern aus diesem Werkstoff lassen sich für Anwendungstemperaturen von bis zu etwa 300° C einsetzen.

Dieser Edelstahl lässt sich durch eine Wärmebehandlung nicht härten, sondern erhält seine Federsteifigkeit (Federhärte) durch Kaltverformung. Obgleich er als nicht magnetisch kategorisiert ist, weist er als Folge der Kaltbearbeitung einen geringen Restmagnetismus auf.

Große Einsatzgebiete für Wellenfedern aus dem nichtrostenden Edelstahl 1.4310 sind die Automobilindustrie, die Elektrotechnik, die Verbindungstechnik sowie der Maschinen-, Apparate- und Behälterbau. Aber auch für Wellenfeder-Applikationen in der Chemietechnik, der Petrochemie und der Lebensmittelindustrie lässt er sich anwenden.

Nichtrostender Edelstahl 17-7 PH (X7CrNiAl17-7) *EN-Werkstoffnummer 1.4568 - AISI-Systemnummer 631*

Der Nichtrostende Edelstahl mit der EN-Werkstoffnummer 1.4568 ist im Markt auch geläufig unter der Herstellerbezeichnung 17-7 PH (Precipitation Hardening). Es handelt sich dabei um einen halbaustenitischen ausscheidungshärtenden Stahl von hoher Festigkeit und Härte, der sich durch hervorragende Ermüdungseigenschaften – also sehr gute Langzeit- und Dauerlauf-Eigenschaften – sowie eine gute Korrosionsbeständigkeit auszeichnet. Des Weiteren zeigt er bei der Wärmebehandlung eine nur minimale Verformung. Er gehört zu den Standardwerkstoffen zur Herstellung von Wellenfedern.

Der Nichtrostende Edelstahl 1.4568 wird im geglühten Zustand leicht geformt und dann durch Wärmebehandlungen auf sein hohes Festigkeitsniveau gebracht. Die außergewöhnlichen hohen Festigkeitseigenschaften im Zustand CH900, RH950 und TH1050 bietet viele Vorteile (allerdings mit Kompromissen hinsichtlich der Zähigkeit und Verarbeitbarkeit). Bei Anwendungen unter hoher Beanspruchung, bei denen der Faktor Materialermüdung eine große Rolle spielt, übertrifft der Edelstahl 1.4568 (17-7 PH) auch Kohlenstoffstähle von hoher Güte. Nach dem Aushärten zeigt der Werkstoff eine blaue, braune oder silberne Farbe.

Im ausgehärteten Zustand verfügt diese Legierung über hervorragende mechanische Eigenschaften bei Temperaturen von bis zu 480° C. Auch seine Federeigenschaften erhält dieser Stahl durch Ausscheidungshärten auf die Bedingung CH900. Daraus gefertigte Wellenfedern können Temperatur von bis zu 343° C (650° F) ausgesetzt werden.

Die Korrosionsbeständigkeit des Edelstahls 1.4568 (17-7 PH) ist jener der härtbaren Chromtypen überlegen, in einigen Umgebungen entspricht sie in etwa jener austenitischer rostfreier Chrom-Nickel-Stähle. Die allgemeine Korrosionsbeständigkeit ist mit der von rostfreien Stählen des Typs 304 oder 302 vergleichbar.

Im Zustand CH900 zeigt der Edelstahl 1.4568 (17-7 PH) einen Magnetismus ähnlich jenem von Kohlenstoffstahl.

Hastelloy® C-276 (NiMo16Cr15W) *EN-Werkstoffnummer 2.4819 – UNS-Systemnummer N10276*

Hastelloy® ist der Markenname einer Nickelbasis-Legierung des Herstellers Haynes International, Inc., die in mehreren Varianten zur Verfügung steht. Diese auch als

Superlegierungen bezeichneten Edelstähle sind gegen zahlreiche aggressive Chemikalien beständig und gelten als sehr resistent gegenüber Korrosion. Für die Herstellung von Wellenfedern verwendet Smalley® vorrangig die Legierung Hastelloy® C-276. Hierbei handelt es sich um eine Nickel-Molybdän-Chrom-Legierung mit Wolfram. Sie verfügt explizit über eine überaus hohe Korrosionsbeständigkeit.

Die Legierungen der Gruppe Hastelloy® C wurde ursprünglich als Werkstoff für Antriebsdüsen von Düsentriebwerken entwickelt. Ihre sehr gute Temperaturbeständigkeit führte im Laufe der Jahre aber auch zur Verwendung in vielen anderen Bereichen des Ingenieurwesens.

Diese Nickel-Chrom-Molybdän-Legierungen zeichnen sich – auch bei höheren Temperaturen – insbesondere durch eine hohe Beständigkeit gegen Spaltkorrosion, Lochkorrosion und Spannungsrisskorrosion in oxidierenden und reduzierenden Medien aus. Weiterhin erweist sich der Werkstoff als gut beständig gegen eine Vielzahl korrosiver Medien einschließlich starker Oxidationsmittel wie Eisen(III)-Chlorid und Kupfer(II)-Chlorid, Schwefelsäure, Salpetersäure, Phosphorsäure, Chlor (trocken), Ameisensäure und Essigsäure sowie heiße Medien. Darüber hinaus zeigt Hastelloy® C-276 eine gute Beständigkeit in feuchtem Chlorgas, Natriumchlorid und Chlordioxidlösungen.

Aus diesen Gründen eignet sich Wellenfedern aus Hastelloy® C-276 beispielweise sehr gut für den Einsatz in den Baugruppen der Anlagen, Apparate und Leitungssysteme der chemischen und pharmazeutischen Industrie oder auch in den Druckbehältersystemen von Kernkraftwerken.

Weitere typische Anwendungsbereiche für diese Superlegierung sind die Aufschluss- und Bleichbehälter der Papier- und Zellstoffindustrie, Wasch- und Rührwerke sowie nassgehende Ventilatoren in der Rauchgasentschwefelung, Komponenten für die Sauergasanwendung, Reaktoren für die Essigsäureproduktion, Schwefelsäure-Kühler sowie die Herstellung und Verarbeitung verunreinigter Phosphorsäure.

6. Auswahlkriterium Magnetismus und elektrische Leitfähigkeit

Berylliumkupfer (Beryllium Copper) Legierung 25 (CuBe2)

EN-Werkstoffnummer 2.1247 – UNS-Systemnummer C17200

Berylliumkupfer bzw. Kupferberyllium ist eine niedriglegierte, hochleitfähige Kupferlegierung und zählt zu den hochfesten Werkstoffen dieser Legierungsfamilie. Es enthält 1,8 bis 2,0 Gewichtsprozent Beryllium. Als weitere Elemente sind Nickel, Cobalt und Eisen enthalten.

Berylliumkupfer ist chemisch sehr widerstandsfähig, nicht ferromagnetisch und verfügt über eine sehr hohe Festigkeit. Wellenfedern aus Berylliumkupfer können vielfach mehr Biegungszyklen aushalten als hochwertige Stahlfedern. Berylliumkupfer eignet sich daher zur Herstellung von für hochbelasteten, hohem Verschleiß ausgesetzten Wellenfedern für den Maschinenbau, die Elektrotechnik, die Marinetchnik sowie den Motoren- und Getriebebau.

Im ausgehärteten Zustand kann die Berylliumkupfer Legierung 25 Zugfestigkeiten von bis zu 1500 MPa erreichen. Im Gegensatz zu anderen Kupferlegierungen weist der Werkstoff die höchste Dauerfestigkeit auf und bietet eine bemerkenswerte Beständigkeit gegen den Verlust seiner physikalischen Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen.



Wellenfeder aus Berylliumkupfer für den Einsatz im Anlagenbau

Die elektrische Leitfähigkeit der Legierung 25 liegt bei 22 bis 25 Prozent nach dem IAC-Standard (International Annealed Copper Standard). Sie ist im Vergleich zu Stahl hoch

(ca. $10 \cdot 10^6$ S/m bis $35 \cdot 10^6$ S/m), etwa 2 - 4 mal so hoch wie jene von Phosphorbronze sowie deutlich größer als die anderer hochfester Kupferlegierungen. Allerdings liegt sie wiederum, deutlich niedriger als die elektrische Leitfähigkeit von reinem Kupfer (ca. $58 \cdot 10^6$ S/m).

Zu den großen Anwendungsgebieten von Berylliumkupfer Legierung 25 zählen auch die Öl- und Gasindustrie, die Fluidtechnik sowie die Unterhaltungselektronik. Aufgrund seiner niedrigen Neigung zur Funkenbildung (ein Hammerkopf aus Berylliumkupfer schlägt beispielsweise keine Funken) ist Berylliumkupfer zudem ein bevorzugter Werkstoff zur Herstellung von Wellenfedern für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen – etwa im Bergbau oder in der Kraftwerkstechnik.

Phosphorbronze, Typ A (CuSn)

Phosphorbronze ist eine Legierung aus Kupfer mit 0,5 bis 11 Prozent Zinn und 0,01 bis 0,35 Prozent Phosphor. Dabei stärkt das Zinn die Korrosionsbeständigkeit und die Festigkeit der Legierung, während der Phosphor ihre Verschleißfestigkeit und Steifigkeit erhöht. Phosphorbronzen zeichnen sich grundsätzlich durch Zähigkeit, Festigkeit und niedrige Reibungskoeffizienten aus.

Phosphorbronze Typ A ist ein traditioneller nicht ferromagnetischer Werkstoff für die Herstellung von Wellenfedern, die in der praktischen Anwendung gegen Materialermüdung und Verschleiß gefeit sein müssen und außerdem eine Beständigkeit gegen chemische Korrosion sowie eine gute elektrische Leitfähigkeit aufweisen sollen. Dabei erweist sich Phosphorbronze in vielen Fällen als kostengünstigere Alternative zu Kupferberyllium. Es ist allerdings hinsichtlich seiner physikalischen Leistungsfähigkeit darunter einzuordnen.



Wellenfedern aus Phosphorbronze für die Elektrotechnik

Große Einsatzgebiete für Wellenfedern aus Phosphorbronze sind die Elektrotechnik und der allgemeine Maschinen- und Anlagenbau. Phosphorbronze kommt allerdings auch in der Kryotechnik (Tiefemperaturtechnik) zum Einsatz. Hierbei macht man sich die

Kombination aus der guten elektrischen Leitfähigkeit und niedrigen Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffs zunutze.

7. Auswahlfaktor Biokompatibilität (Medizintechnik)

Titan (Grade 5)

Titan hat bei Raumtemperatur eine Dichte von $4,50 \text{ g/cm}^3$ und liegt damit nahe an der Grenze zwischen Leicht- und Schwermetallen. Die in der Technik meistverwendete Titanlegierung ist Ti6Al4V, die ein gutes Verhältnis zwischen hoher Festigkeit und geringer Dichte bietet. Der Werkstoff ist meerwasserbeständig und weist eine hohe Beständigkeit gegenüber vielen korrosiven Medien auf.

Insbesondere verfügt er über eine hervorragende Biokompatibilität. Er kommt daher nicht nur in Luft- und Raumfahrt, im Turbinenbau und im Motorsport zum Einsatz, sondern auch in Dental- und Medizintechnik. Als Biomaterial für Implantate in der Chirurgie und Zahnheilkunde ist er weit verbreitet. Eine immunologische Abstoßungsreaktion (Implantatallergie) ist bei Titan nicht zu erwarten. In der chirurgischen Orthopädie gehört der Werkstoff zu den Standardwerkstoffen für die Herstellung von Endoprothesen (künstlichen Knie-, Schulter- und Hüftgelenken) und Osteosynthesen (Schrauben, Platten, Nägeln). Die Oxidschicht von Titan ermöglicht das Anwachsen von Knochen an das Implantat (Osseointegration) und ermöglicht damit die Integration des Implantates in den menschlichen Körper.

Zwar kommt die Titanlegierung Ti6Al4V für die Herstellung von Wellenfedern nur selten zum Einsatz, für ihre Verwendung in medizintechnischen Baugruppen wäre sie allerdings der bevorzugte Werkstoff.

Elgiloy® (CoCr20Ni16Mo7) AMS-5876

Elgiloy® ist ein eingetragenes Warenzeichen des Unternehmens Combined Metals of Chicago. Der Edelstahl gilt als Superlegierung und ist bekannt für seine hervorragende Beständigkeit gegen korrosive Umgebungen. Er eignet sich ebenfalls für die Herstellung von Wellenfedern für Anwendungsbereiche in denen erhöhte Temperaturen vorherrschen. Dabei kommen Elgiloy®-Edelstähle bevorzugt in der Ölindustrie zum Einsatz. Sie zeigen gegenüber anderen von der National Association of Corrosion Engineers (NACE) zugelassenen Werkstoffen eine höhere Zuverlässigkeit, wobei insbesondere die hohe Spannungsrissbeständigkeit in schwefelhaltigen Umgebungen erwähnenswert ist.

Ein Vergleich mit konventionellen Stählen unterstreicht die hohe Leistungsfähigkeit dieser eher selten angewendeten Superlegierung. So soll Elgiloy® bei einer Temperatur von 343°C (650°F) beispielsweise eine über 600 Prozent bessere Lasthaltefähigkeit aufweisen als Rostfreier Edelstahl der Güte 17-7 PH. Des Weiteren bietet die Superlegierung mit über 100 Prozent mehr Zyklen eine deutlich höhere Beständigkeit gegenüber Materialermüdung und eine deutlich höhere Bruchbeständigkeit als Kohlenstoffstahl.

Elgiloy® ist nicht magnetisch und hat aufgrund der Wärmebehandlung eine blaubraune Färbung. Für die Herstellung von Wellenfedern verwendet Smalley® explizit die Elgiloy®-Legierung nach AMS-5876.

8. Auswahlkriterium Lieferzeit (Verfügbarkeit)

8.1 Kurze Lieferzeiten und hohe Verfügbarkeit

Viele der von TFC und Smalley® für die Herstellung von Wellenfedern eingesetzten Werkstoffe sind auf dem Weltmarkt gut verfügbar und gehören zum ständigen Lagersortiment der Unternehmen. Zu diesen Standardmaterialien gehören insbesondere einige der zuvor bereits aufgeführten Kohlenstoff- und Edelstähle. Meist kurzfristig lieferbar sind also Wellenfedern aus diesen Stählen:

Nichtrostender Edelstahl (X5CrNiMo17-12-2)

EN-Werkstoffnummer 1.4401 - AISI-System-Nummer 316

Chrom-Nickel-Stahl mit Molybdänzusatz (V4A). Gute Beständigkeit gegenüber Korrosion. Geeignet für Wellenfedern, die in natürlichen Umgebungen, in Umgebungen mit mäßigen Chlor- und Salzkonzentrationen sowie in der Lebensmitteltechnik zum Einsatz kommen. Ebenfalls geeignet zur Herstellung von Wellenfedern, die in Meerwasser-Anwendungen zum Einsatz kommen.

Weitere Einsatzgebiete: Automobilindustrie, Haushaltsindustrie, Textilveredelung, Schwimmbadtechnik, Gebäudetechnik und Architektur.

Details dazu siehe Seite 7

Nichtrostender Edelstahl 17-7 PH (X7CrNiAl17-7)

EN-Werkstoffnummer 1.4568 - AISI-System-Nummer 631

Härtbarer Stahl von hoher Festigkeit und Härte mit hervorragenden Ermüdungseigenschaften, guter Korrosionsbeständigkeit. Die Korrosionsbeständigkeit ist jener der härtbaren Chromtypen überlegen, in einigen Umgebungen entspricht sie ungefähr jener austenitischer rostfreier Chromnickelstähle.

Im ausgehärteten Zustand bietet dieser Stahl sehr gute mechanische Eigenschaften bei Temperaturen von bis zu 480° C. Daraus gefertigte Wellenfedern können Temperaturen von bis zu 343° C (650° F) ausgesetzt werden.

Details dazu siehe Seite 10

Nichtrostender Edelstahl (X5CrNi18-8)

EN-Werkstoffnummer 1.4310 - AISI-System-Nummer 302

Chrom-Nickel-Stahl mit guten physikalischen Eigenschaften. Standard-Werkstoff für Wellenfedern von TFC/ Smalley®. Relativ gut beständig gegen interkristalline Korrosion. Einsetzbar für Wellenfedern mit Anwendungstemperaturen von bis zu etwa 300° C.

Wichtige Einsatzgebiete: Automobilbau, Elektrotechnik, Verbindungstechnik, Maschinen-, Apparate- und Behälterbau sowie Chemietechnik, Petrochemie und Lebensmittelindustrie.

Details dazu siehe Seite 16

Kohlenstoffstahl/Federstahl (XC67 - XC75)

EN-Werkstoffnummern 1.1231 - 1.1248 / SAE 1070 -1090 sowie SAE 1060 - 1075

Smalley verwendet für die Herstellung seiner Wellenfedern eine Reihe von Kohlenstoffstählen, die aufgrund ihrer Eigenschaften auch als klassische Federstähle gelten. Sie eignen sich für Einsatztemperaturen von bis 121° C (249° F).

Federstahl, ölgütet (SAE 1070-1090): Gehärteter Federstahl mit hohem Kohlenstoffgehalt. Zugfestigkeit und Streckgrenze werden durch eine Wärmebehandlung im Ölbad maximiert.

Federstahl, kaltgezogen (SAE 1060-1075): Kaltgezogener, vergüteter Federstahl mit hohem Kohlenstoffgehalt. Ihre maximale Zug- und Scherfestigkeit erreicht diese Güte durch Kaltziehen.

Beide Federstähle eignen sich vorrangig für Wellenfeder-Anwendungen mit einer geschützten Umgebung.

Details dazu siehe Seite 15

8.2 Moderate oder längere Lieferzeiten

Einige der von Smalley® für die Herstellung von Wellenfedern eingesetzten Edelstahl-Werkstoffe gehören zur Gruppe der Sonder- und Superlegierungen (Exotic Alloys). Dazu zählen beispielsweise die bereits aufgeführten Inconel®, Waspaloy®- und Hastelloy®-Legierungen. Sie sind keine Lagerware, verhältnismäßig hochpreisig und – je nach aktueller Situation auf dem Weltmarkt – mitunter nicht jederzeit kurzfristig verfügbar. Daher empfiehlt es sich, die zu erwartende Lieferzeit der daraus gefertigten Wellenfedern bereits frühzeitig mit den Kundenberatern von TFC abzustimmen.

9. Auswahlfaktoren Lebensdauer und Kosteneffizienz

Eine fundierte Bewertung der beiden übergreifenden Faktoren Lebensdauer (Standzeit) und Kosteneffizienz (Wirtschaftlichkeit) ist für die Auswahl des Wellenfeder-Werkstoffs von entscheidender Bedeutung. Dabei gilt es, beide Faktoren stets mit Weitblick gegeneinander abzuwägen. Denn während sich ein zunächst attraktiver High-End-Werkstoff im Nachhinein als völlig überdimensioniert und viel zu kostenintensiv erweisen kann, ist der auf den ersten Blick kostengünstigste Werkstoff den Standzeit-Anforderungen der geplanten Anwendung möglicherweise nicht gewachsen.

Meist zeigt sich erst im intensiven Gespräch zwischen dem Konstrukteur des Kunden und dem Wellenfeder-Experten von TFC, welches Material im konkreten Fall die ideale Lösung darstellt. In diesen Diskurs fließen nicht nur die rein physikalischen und konstruktiven Parameter der Wellenfeder-Anwendung mit ein, sondern auch zahlreiche weiterführende und periphere Aspekte. Erfahrungsgemäß zählen dazu beispielsweise Fragestellungen wie diese:

- Wie kurzfristig soll die Wellenfeder verfügbar sein?
- In welcher Losgröße soll die Wellenfeder zukünftig gefertigt werden?
- Auf welche Weise erfolgt der Einbau der Wellenfeder in die Baugruppe?
- Welchen Management-Prinzipien folgt der Montageprozess des Kunden?
- Wie ist der zukünftige Instandhaltungsaufwand der Anwendung abzuschätzen?
- Wie lange werden die Wellenfedern beim Kunden zwischengelagert?
- Bestehen bereits Erfahrungen mit anderen Feder-Werkstoffen?
- Gibt es unbekannte Faktoren hinsichtlich des Einsatzes der Wellenfeder?
- Ist die Anwendung eine Neuentwicklung oder ein etabliertes Produkt?

u.v.a.m.

Je nach Anwendungsfall, Branche oder auch Entwicklungsstadium – frühe Prototypen-Phase oder schon Großserien-Produktion? – fallen die Antworten auf diese Fragen ganz unterschiedlich aus und haben ganz unterschiedliche Relevanz für die Auswahl des geeigneten Wellenfeder-Werkstoffs.

10. Die sechs verschiedenen Typen von Wellenfedern

Wellenfedern mit Spalt oder überlappenden Enden

Konventionelle Wellenfedern mit Spalt oder mit überlappenden Enden werden für eine Vielzahl von Anwendungen eingesetzt. Bei kurzen Federwegen und geringen bis mittleren Kräften sind sie ein Garant für hohe Präzision und Zuverlässigkeit. Beide Arten von Wellenfedern erlauben eine radiale Ausdehnung bzw. ein Vergrößern des Durchmessers im Bauraum, ohne ein Verklemmen, wie es bei gestanzten Federn oft zu beobachten ist. Je nach dem Durchmesser der Wellenfeder wird entweder ein Spalt zwischen den Drahtenden frei gelassen oder die Enden überlappen sich. Die Enden sind also frei und können sich zusammen- oder übereinander schieben, wenn sich der äußere Durchmesser der Feder beim Stauchen vergrößert.

Der Außendurchmesser einer Wellenfeder mit Spalt lässt ein Spiel von 0,5 mm an jeder Seite der Bohrung. Ihr Innendurchmesser hat einen Abstand von 0,25 mm zur Welle. Wird die Feder gestaucht, vergrößern sich beide Durchmesser, bis der Außendurchmesser an der Bohrung anliegt. Bei einer weiteren Stauchung bewegen sich die Spaltenden zueinander, während der Außendurchmesser gegen die Bohrung drückt. Federn mit überlappenden Enden funktionieren nach dem gleichen Prinzip.

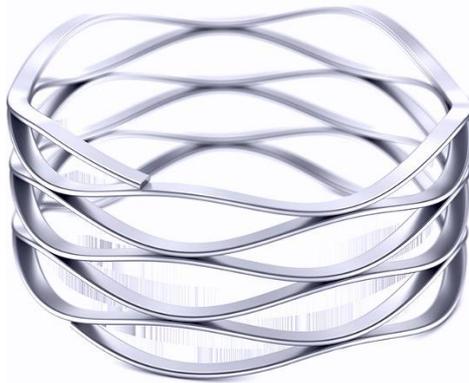


Wellenfedern mit Spalt und offenen Enden

Crest-to-Crest®

Crest-to-Crest®-Wellenfedern bestehen aus durchgängig gewickelten Windungen, wobei sich die Federrate proportional zur Anzahl der Windungen reduziert. Daher eignen sich diese Federn besonders gut für Anwendungen, die relativ große Federwege mit einer relativ gleichmäßigen, linearen Kraftentfaltung verlangen. Dies wird gewährleistet, indem das lokale Minimum einer Welle exakt auf das lokale Maximum der darunter befindlichen Welle im Herstellungsprozess ausgerichtet wird. Ein nachträgliches Ausrichten der Windungen, das Einlegen von Zwischenscheiben oder das Setzen eines fixierenden Schweißpunktes sind nicht erforderlich, da die Wellenfedern aus einem durchgehenden Flachdraht bestehen.

Crest-to-Crest®-Wellenfedern bieten den Vorteil, im Rahmen ihrer Anwendung wichtigen Bauraum einzusparen – insbesondere wenn gezielt eine Runddrahtfeder ersetzt werden soll oder muss. Dabei können dieselbe Kraft bereitgestellt und sämtliche Spezifizierungen einer herkömmlichen Runddrahtfeder übernommen werden. Zusätzlich lässt sich jedoch bis zu 50 Prozent des axialen Bauraums einsparen. Auf diese Weise lassen sich geringere Arbeitshöhen und geringere freie Höhen realisieren.



Crest-to-Crest®-Wellenfeder

Crest-to-Crest® mit parallelen Enden

Crest-to-Crest®-Wellenfedern sind auch mit parallel ausgeführten Enden verfügbar. Sie bieten eine 360°-geschlossene Kontaktfläche (eine Ausführung mit gewellten Enden bietet lediglich die lokalen Maxima der Wellen als Kontaktpunkte). Die parallelen Enden gewährleisten eine gleichmäßige Kraftverteilung auf die Anlageflächen in der Anwendung.



Crest-to-Crest®-Wellenfedern mit parallel ausgeführten Enden

Nested

Wellenfedern mit angelegten Windungen vom Typ NESTED werden aus einem durchgehenden Flachdraht gewickelt. Bei Anforderungen mit höheren Lastanforderungen erübrigt sich dadurch ein Stapeln mehrerer einlagiger Flachdraht-Wellenfedern. Die Federrate einer NESTED steigt proportional zur Anzahl der Windungen, so dass sich höchste Vorspannkkräfte realisieren lassen.



Nestet-Wellenfeder

WAVO®

WAVO®-Wellenfedern werden aus einem Runddraht hergestellt, um die Aufnahme höherer Lasten bei Arbeitshöhe gegenüber einlagigen Wellenfedern aus Flachdraht zu gewährleisten. Damit können ähnliche Lasten wie mit einer gestanzten Tellerfeder aufgebracht werden. Allerdings beansprucht eine WAVO®-Wellenfeder nur einen Bruchteil des radialen Bauraums.



WAVO®-Wellenfedern

Linear-Federn

Linear-Federn haben eine kontinuierliche Wellenform („marcelled“) und bestehen aus dem gleichen Ausgangsmaterial wie Flachdraht-Wellenfedern. Sie weisen daher die

gleichen Eigenschaften auf wie Wellenfedern: Bei einer bestimmten Lasthöhe wird die Aufnahme einer spezifizierten Last gewährleistet. Je nach Installation des Federbands können definierte Kräfte in axialer oder radialer Richtung aufgebracht werden. Eine axial wirkende Kraft wird erzeugt, wenn die Linear-Feder geradlinig eingesetzt wird. Führt man die Enden der Feder zusammen, so dass ein Ring entsteht, wirkt die Kraft in radialer Richtung.

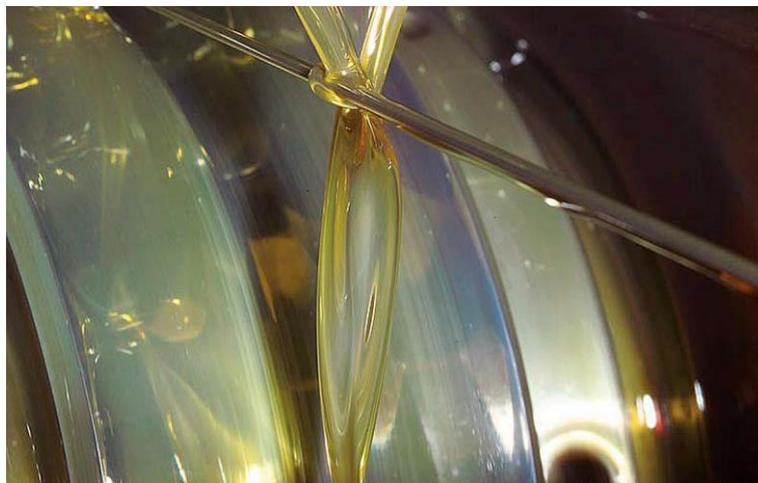


Linear-Federn mit kontinuierlicher Wellenform

Weitere Detailinformationen zu den einzelnen Typen von Wellenfedern finden Sie im aktuellen TFC-Katalog sowie unter www.tfc.eu.com.

11. Das No-Tooling-Verfahren

Mit dem Ziel, einen nahezu perfekten Kreis zu erstellen, wird beim Fertigungsverfahren ‚No-Tooling-Cost‘ ein vorgehärteter Flachdraht über eine hohe Kante gewunden. Im Vergleich zur Herstellung gestanzter Wellenfedern und Sicherungsringe gewährleistet dieser auch als Circular-Grain[®]-Verfahren bezeichnete Prozess ein mindestens genauso so hohes Maß an Härte, Dimensionstreuung und berechenbarer Belastbarkeit. Dabei lassen sich die kantengewundenen Produkte je nachgeforderter Spezifizierung auf jeden Innendurchmesser zwischen 6 mm und 2.300 mm sowie mit einer beliebigen Anzahl von Windungen wickeln. Im Gegensatz zum Stanzverfahren gibt es beim ‚No-Tooling-Cost‘-Methode keine Materialverschwendung.



Die Wellenfedern von Smalley[®]/ TFC bestehen aus gewalzten Flachdraht

Basierend auf einer hohen Fertigungsflexibilität kann Smalley[®] mit dem Circular-Grain[®]-Verfahren kundenspezifische Designänderungen bei Prototypen oder Sonderkonfigurationen ohne zusätzliche Spezialwerkzeuge oder aufwändige Modifizierungen schnell und unkompliziert umsetzen. Das Unternehmen ist daher nicht nur für schnelle Großserienproduktionen bestens gerüstet, sondern auch für die Realisierung kleinerer Serien sowie für die Herstellung von Prototypen oder die Umsetzung anspruchsvoller Designanforderungen.

Die Fertigung von Smalley[®] ist so ausgerichtet, dass ein großes Spektrum an Werkstoffen und voreingestellten Produktionsparametern ständig zur Verfügung steht und schnell abrufbar ist. Zu den sofort verfügbaren Materialien für Standardfedern zählen ein wärmebehandelter Federstahl sowie Edelstahl in drei verschiedenen Güten (siehe oben).

12. TFC und Smalley® - Ihre Partner für Qualität und Sicherheit

Alle Produkte von TFC und Smalley® sind konform zu RoHS/WEEE und REACH. Auf Anfrage erhält jeder Kunde entsprechende Materialzertifikate sowie vollständige Materialzertifizierungen. Zudem sehen sich TFC und das Produktionsteam der Smalley® Steel Ring Company einer Qualitätspolitik verpflichtet, die eine unter anderem eine kontrollierte Chargenabweichung, eine statistische Qualitätskontrolle, die konsequente Fehlervermeidung sowie kontinuierliche Produkt- und Prozessoptimierungen vorsieht.

Basierend auf der ständigen Weiterentwicklung des Qualitätsmanagements sowie der konsequenten Umsetzung der Normen aus Luft- und Raumfahrt haben TFC und Smalley® bei Erstausrüstern (OEMs) in aller Welt den Status des anerkannten Zulieferers TFC erworben und sich als bevorzugte Bezugsquelle von Smalley® Wellenfedern und Spirolox-Sicherungsringen etabliert.

In Übereinstimmung mit den Anforderungen der ISO-Zertifizierungen haben beide Unternehmen Qualitätssicherungssysteme installiert, an deren Verbesserung ständig weitergearbeitet wird. Hierbei setzt insbesondere Smalley® seit über 30 Jahren auf den Einsatz modernster Methoden und Technologien. So gewährleisten beispielsweise die eingesetzten Werkzeuge der statistischen Prozesskontrolle (SPC) die Leistungsfähigkeit und Prozessstabilität des ‚No-Tooling-Cost‘-Verfahrens. Sie ermitteln zunächst die allgemeinen Abmessungen für die Untersuchung und besondere Gründe für Abweichungen in den Produkten. Anschließend werden Daten zu kritischen Abmessungen gesammelt und ausgewertet. Es erfolgen regelmäßige Probeentnahmen und Messungen während der Produktion, bei der Endabnahme sowie auch bei der Qualitätskontrolle vor dem Versand.

Die Maschinenfähigkeits-Untersuchungen von Smalley® ermitteln etwaige Ursachen für Abweichungen bevor sie zum Problem werden können, und die Leistungsfähigkeit der gesamten Fertigungstechnik wird hinsichtlich der Primär- und Sekundärprozesse, der Wärmebehandlung und der Oberflächenvergütung akribisch überwacht. Definierte Verfahrensregeln gewährleisten die Reproduzierbarkeit und Wiederholgenauigkeit der eingesetzten Messsysteme.

Dank der nahezu lückenlosen Qualitätsdokumentation von TFC und Smalley® konnten zahlreiche Kunden den Aufwand für ihre eigene Eingangskontrollen reduzieren oder diese sogar ganz abschaffen. Viele Kunden vertrauen inzwischen auf TFC als einzige Bezugsquelle für Wellenfedern, Sicherungsringe und Schnappinge.