

Beryllium – der Werkstoff für Uhrenfedern

Die Aufgabe einer Feder besteht prinzipiell darin Arbeit zu speichern und wieder abzugeben. Sie speichert also potentielle Energie. Dies geschieht durch elastische Verformung des Federmaterials. Die größtmögliche Energiemenge, die eine Feder ohne bleibende Verformung aufspeichern kann, ist durch die nachstehende Formel gegeben:

$$\varphi_{max} = \lambda V \frac{\sigma^2}{2E}$$

wobei λ ein Koeffizient ist, der von der Form der Feder abhängt, während V das Federvolumen, σ die Elastizitätsgrenze und E den E-Modul des Federmaterials darstellen.

Aus dieser Formel geht hervor, dass man bei der Verarbeitung von Federmaterial vor allem daran interessiert ist, ein Material mit einer sehr hohen Elastizitätsgrenze und einem geringen E-Modul zu verwenden.

Berylliumbronzes besitzen eine Elastizitätsgrenze in der Gegend der Spezialfederstähle. Ihr wesentlich niedrigerer E-Modul (verglichen mit Stahl) macht sie besonders geeignet für die Herstellung von Federn. Die Überlegungen bezüglich der aufgespeicherten Energie sind aber nicht allein maßgeblich zur Beurteilung der Qualität einer Feder. Die Ermüdungsfestigkeit wie auch die Form der Hysterese sind bei mancherlei Anwendungen von größter Bedeutung.

Im industriellen Gebrauch werden außerdem die Federn verschiedenen Arbeitsbedingungen unterworfen, die besondere physikalische oder chemische Eigenschaften, wie elektrische Leitfähigkeit, Korrosionsbeständigkeit, Amagnetismus usw., erforderlich machen. Außerdem müssen sich die Federmaterialien so gut wie möglich für die Federherstellung eignen. Dies ist besonders dann von Bedeutung, wenn komplizierte Formen hergestellt werden

sollen. Berylliumbronze entspricht wegen ihrer Vergütbarkeit einerseits und ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften andererseits in hervorragender Weise den verschiedenen erwähnten Anforderungen. Unter diesem Gesichtspunkt möchten wir kurz die verschiedenen Eigenschaften dieser Legierung besprechen.

1. Zusammensetzung der Berylliumbronze-Vergütung

Berylliumbronze ist eine binäre Kupfer-Berylliumlegierung mit ungefähr 2% Berylliumgehalt (mit gewissen veredelnden Zusätzen). Durch eine zweifache thermische Behandlung ist es möglich, diese Legierung in ihren mechanischen Eigenschaften äußerst wirkungsvoll zu vergüten. Die thermische Behandlung besteht im Prinzip in einer Wasserabschreckung nach einer Glühung bei 750° C und einem Anlassen auf eine Temperatur von 300–400° C.

Nach dem Abschrecken besitzt die Berylliumbronze eine Vickers-Härte von ungefähr 1000–1300 N/mm², eine geringe Zugfestigkeit und hohe Dehnung. Im Gegensatz zum Stahl ist Berylliumbronze nach dem Abschrecken weich. Durch das Anlassen erreicht Berylliumbronze eine Vickers-Härte von 3500 N/mm², eine Zugfestigkeit in der Größenordnung von 120 N/mm² und eine Dehnung von einigen Prozenten. Im angelassenen Zustand ist Berylliumbronze somit hart.

2. Die mechanischen Eigenschaften der Halbfabrikate aus Berylliumbronze

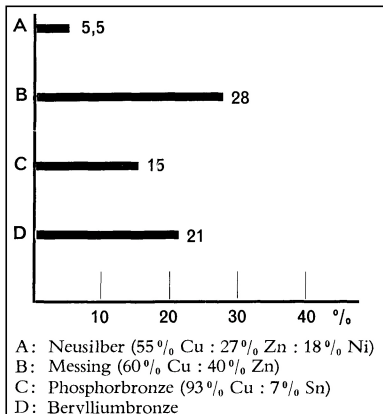
Berylliumbronze wird für die Federherstellung in Form von Halbfabrikaten, d. h. in Bändern, Draht oder Stangen, verwendet. Diese Produkte werden immer in abgeschrecktem Zustand geliefert, doch müssen sie, je nach gewünschtem Verformungsgrad, etwas verschiedenartig behandelt werden. Die mechanischen Eigenschaften sind in der unterstehenden *Tabelle I* kurz zusammengefasst:

TABELLE I

| | abgeschreckt | abgeschreckt gewalzt | abgeschreckt angelassen | abgeschreckt, ge- walzt, angelassen |
|--|--------------|-------------------------|----------------------------|--|
| Zugfestigkeit | 50—60 | 65—85 | 100—110 | 125—150 |
| Elastizitätsgrenze | 30—40 | 60—75 | 90—100 | 120—140 |
| Dehnung | 30—50 | 2—6 | 1—5 | unterhalb 2 |
| Vickershärte | 100—130 | 180—230 | 350—380 | 385—420 |
| Elastizitätsgrenze (Druckversuch) | — | — | 90—110 | 120—150 |
| Elastizitätsgrenze (Torsion, gezogenes Material) | — | — | — | 70 |
| Ermüdungsfestigkeit (rotierender Lastwechsel, gezogenes Material) | — | — | — | 27 |
| Ermüdungsfestigkeit (Belastungswechsel in einer Richtung, Walzmaterial) | — | — | 25 | 25 |
| E-Modul | 12,500 | — | 13,400 | 13,400 |
| Torsionsmodul | — | — | 4,800 | 4,800 |
| Temperaturkoeffizienten des E-Moduls | — | — | — | 0,232 × 10 ⁻⁶ |

3. Physikalische und chemische Eigenschaften der Berylliumbronze

Im allgemeinen besitzen Berylliumbronzen ähnliche physikalische und chemische Eigenschaften wie Kupfer. So ist die Berylliumbronze nicht ferromagnetisch und besitzt gute Korrosionsbeständigkeit in feuchter Atmosphäre oder Meeresluft. Ihre elektrische Leitfähigkeit ist dagegen entschieden geringer als die des Kupfers. Sie ist in angelassenem Zustand etwas höher als nach dem Abschrecken. Immerhin sei hier beigefügt, dass sie im Vergleich zu den üblichen Kupferlegierungen für Federzwecke zwischen denjenigen von Phosphorbronze und Messing liegt. Dies geht zum Beispiel aus der nebenstehenden Abbildung hervor.



Vergleich der elektrischen Leitfähigkeit verschiedener Kupferlegierungen (Cu = 100%)

4. Gründe zur Verwendung von Berylliumbronze als Federmaterial

A. Herstellung der Berylliumbronze-federn

Die Federn werden aus abgeschrecktem Material (mit oder ohne Kaltverformung) geformt und anschließend zum Erreichen der vollen Härte angelassen.

Diese Verarbeitungsart hat selbstverständlich in der Herstellung komplizierter Formen große Vorteile. In abgeschrecktem Zustand besitzt die Berylliumbronze eine große Dehnung, die es gestattet, das Material ohne Gefahr des Einreißen auf sehr kleine Durchmesser zu winden. Im Gegensatz zu den durch Kaltverformung gehärteten Legierungen kann man so auch mit Berylliumbronzen bestimmte Federeigenschaften ganz unabhängig von der Gestalt der fertigen Federn erzielen. Außerdem muss auch nicht in gleichem Masse wie bei den hartgewalzten Metallen auf die Walzrichtung beim Stanzen und Biegen Rücksicht genommen werden.

Tabelle II zeigt die Größenordnung der zulässigen Biegeradien. Wie daraus eindeutig hervorgeht, ist es für viele Teile möglich, die Stanzoperation ohne Rücksicht auf Kristallorientierung und rein unter Berücksichtigung der zweckmäßigsten Verarbeitung vorzunehmen. Das Metall wird, wie erwähnt, im allgemeinen in abgeschrecktem Zustand bearbeitet.

Der Verarbeiter hat lediglich zu entscheiden, ob er das Metall mit oder ohne Kaltverfestigung (durch Walzen oder

Ziehen) für die Herstellung seiner Teile verwenden will. Dieser Entscheid ist natürlich von der Form und den schlussendlich gesuchten Federeigenschaften abhängig. So hat zum Beispiel der kaltverfestigte Zustand gewisse Vorteile.

- Es ist möglich, nach dem Anlassen bessere mechanische Eigenschaften zu erzielen, wie beim Anlassen eines nur abgeschreckten Materials.
- Einfachere Verarbeitung: Das Material in weichem Zustand neigt unter gewissen Umständen zum Kleben an den Werkzeugen.
- Geringere Gefahr der Beschädigung der Stücke während der Verarbeitung vor dem Anlassen.

Schließlich scheinen die beim Anlassen selbst auftretenden Deformationen im kaltverfestigten Zustand geringer als im abgeschreckten. Wir können daraus die Konsequenz ziehen, dass Berylliumbronze, wenn immer möglich, in kaltverfestigtem Zustand verwendet werden sollte.

Einschränkungen bestehen in der Gefahr des Einreißen während der Verformungsoperationen, wenn zu geringe Biegeradien gewählt werden. Tabelle II gibt einige Werte zur Beurteilung der minimalen Biegeradien.

TABELLE I

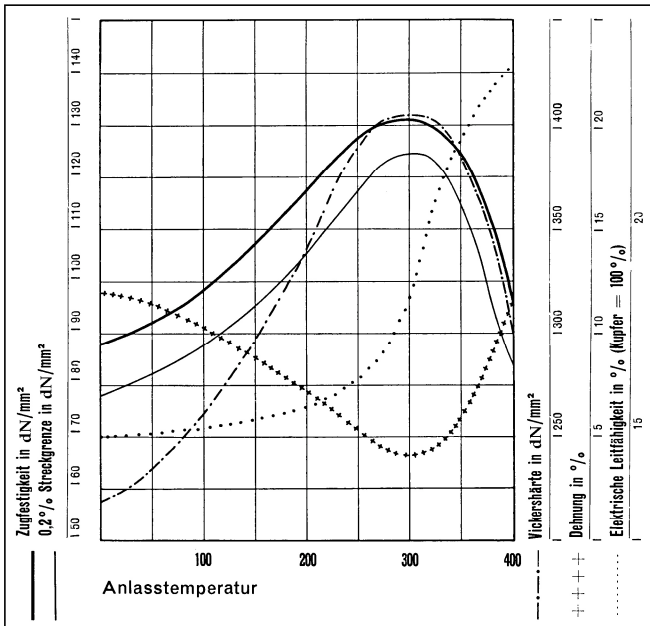
| Materialzustand | Verhältnis: Innerer Biegeradius zu Bandstärke | | |
|--------------------|---|-----------------------------------|----------------------------|
| | Biegen rechtwinklig zur Walzrichtung | Biegen unter 45° zur Walzrichtung | Biegen in der Walzrichtung |
| abgeschreckt weich | 0 | 0 | 0 |
| 1/4 hart | 0,5 | 1 | 1,5 |
| 1/2 hart | 2 | 2,5 | 3 |
| hart | 4,5 | 5,5 | 6 |

Minimale Biegeradien beim Biegen eines Berylliumbronzebandes von 1 mm Stärke um 90°.

B. Eigenschaften der Berylliumbronze-federn.

a. Wahl der Anlassbedingungen

Die vorerwähnten mechanischen und elektrischen Eigenschaften entsprechen einem Anlassen bei 320°. Diese Behandlung gibt der Legierung eine maximale Zugfestigkeit. In Praxis sucht man oft etwas abweichende Eigenschaften. Dies ist beispielsweise der Fall mit Federn, bei welchen eine möglichst hohe elektrische Leitfähigkeit Bedingung ist, oder bei welchen die Form auch während der Montage noch in geringem Masse verändert werden sollte. Wir suchen also im ersten Fall höhere elektrische Leitfähigkeit, im zweiten bessere Dehnung, als wie wir sie bei der Abschreckung bei 320° C erreichen. Dies kann erzielt werden durch Veränderung der Anlassbedingungen. Die nachstehenden Schaubilder, aufgenommen an Berylliumbronze-stangen, zeigen die Unterschiede in den mechanischen und physikalischen Eigenschaften in Abhängigkeit von der Anlassbedingungen so wählen, wie er sie am geeignetsten für die in Aussicht genommene Verwendung betrachtet.



Einfluss der Anlasstemperatur auf mechanische und physikalische Eigenschaften der Berylliumbronze.

b. Beständigkeit der Berylliumbronze-Federn

Damit eine Feder auch während längerer Gebrauchszeit ihr elastisches Verhalten bewahrt, ist es erforderlich, dass das Material aus dem sie besteht, eine hohe Elastizitätsgrenze besitzt und dass andererseits die inneren Spannungen auf den niedrigst möglichen Wert reduziert werden. Im Normalfall der Federfabrikation aus kaltverformtem Material erniedrigt die zur Beseitigung der inneren Stauungen erforderliche Erwärmung die Elastizitätsgrenze des Fertigproduktes.

Berylliumbronzen besitzen in dieser Richtung einen beträchtlichen Vorteil, da gleichzeitig mit der Anlassoperation auch innere Spannungen beseitigt werden. Die Betriebscharakteristiken dieser Federn weisen auch eine bemerkenswerte Stabilität auf. Aus den gleichen Gründen haben auch die Berylliumbronzen geringe Hysteresewerte.

c. Funktion bei höheren Betriebstemperaturen

Während die mechanischen Eigenschaften der durch Kaltverformung verfestigten Materialien mit höheren Temperaturen rascher absinken, kann die Berylliumbronze dagegen bei verhältnismäßig hohen Temperaturen im Dauerbetrieb verwendet werden. Tabelle III zeigt für verschiedene Temperaturen und Anwärzeiten die Warmzugfestigkeit von Berylliumbronzestangen mit 6 mm Durchmesser nach Abschrecken und Anlassen während 2 Stunden bei 320° C. In der Praxis aber werden daher immerhin Federn oft im Laufe ihrer Erhitzung stärkeren Beanspruchungen ausgesetzt, so dass die erwähnten Werte gewisse Veränderungen erfahren können. Diese Veränderungen sind allerdings von der Art und der Größe der Beanspruchung abhängig. Im allgemeinen können Berylliumbronze-Federn ohne irgendwelche Störungen Temperaturen in der Größenordnung von 150 bis 200° C während unbeschränkter Dauer unterworfen werden.

TABELLE III

| Versuchstemperatur | Dauer der Vorwärmerwärmung h | Elastizitätsgrenze in dN/mm ² (0,2%) | Zugfestigkeit dN/mm ² | Dehnung in % |
|--------------------|------------------------------|---|----------------------------------|--------------|
| 20° | 1 | 108,5 | 129 | 6,8 |
| 250° | 1 | 107,5 | 137,5 | 5,8 |
| | 500 | 102,5 | 128,4 | 3,9 |
| | 1000 | 98,8 | 104,0 | 3,9 |
| 300° | 1 | 96,5 | 120,5 | 2,0 |
| | 500 | 76,4 | 104,2 | 3,0 |
| | 1000 | 74,4 | 99 | 4,0 |
| 400° | 1 | 42,5 | 81,3 | 7,0 |
| | 500 | 30,6 | 54,4 | 16,0 |
| | 1000 | 29,3 | 50,3 | 20,0 |

d. Schweißbarkeit

Die Möglichkeit, Berylliumbronzen mit Silber zu löten oder elektrisch zu schweißen, ohne die mechanischen Eigenschaften wesentlich zu verringern, ist eine Eigenheit der Legierung, während andererseits die durch Kaltverformung verfestigten Materialien diese Operationen nur mit einer starken Einschränkung ihrer mechanischen Eigenschaften ertragen.

e. Korrosionsbeständigkeit

Dank ihrer guten Korrosionsbeständigkeit können Berylliumbronze-Federn ohne weiteres in feuchter oder Meeresluft verwendet werden. Dauerversuche in feuchter oder Meeresatmosphäre an einer Reihe von Federn gleicher Form, hergestellt aus Federstahl mit 0,5 % Kohlenstoff, 15%igem Chromstahl, rostfreiem Stahl (18% Cr und 8% Ni) und Berylliumbronzen, haben gezeigt, dass Berylliumbronze-Federn die beste Wechselfestigkeit aufweisen.

f. Elektrischen Strom leitende Federn

Dank seiner hohen Leitfähigkeit eignet sich Berylliumbronze besonders für die Herstellung von stromleitenden Federn. Auch sei hier darauf hingewiesen, dass das Material einer galvanischen Behandlung unterworfen werden kann, ohne dass die mechanischen Eigenschaften beeinträchtigt werden, ein Vorteil, der sich besonders bei den Anwendungen in der Hochfrequenztechnik auswirkt. Es ist tatsächlich möglich, die Berylliumbronze-Federn zu versilbern, um Stücke bester Elastizität herzustellen, die dank ihrer oberflächlichen Silberschicht dem Hochfrequenzstrom äußerst geringen Widerstand entgegensetzen.

Aus der Beschreibung ist ersichtlich, dass Berylliumbronze in sehr vielen Fällen in der Federfabrikation eine vorteilhafte Lösung des Materialproblems darstellt. Die Verwendung der Legierung hat sich in der Tat in einer Art und Weise entwickelt, dass wir sie heute fast überall sowohl für die gebräuchlichen Federtypen, wie Schraubfeder, Spiralfeder, Blattfeder, als auch für spezielle elastische Teile verwenden.

Entnommen aus einem Sonderabdruck „Pro-Metall“ 27.06.1952, Verfasser J. Bourguignon