CH 626 120 A5

(19) SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
BUNDESAMT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

(51) Int. Cl.³: C 22 C 38/28
C 22 C 33/04

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein
Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

ETH-BIBLIOTHEK ZÜRICH

(12) **PATENTSCHRIFT** A5

(11) **626 120**

(21) Gesuchsnummer: 2799/77

(22) Anmeldungsdatum: 07.03.1977

(30) Priorität(en): 08.03.1976 US 665133

(24) Patent erteilt: 30.10.1981

(45) Patentschrift veröffentlicht: 30.10.1981

(73) Inhaber:
Westinghouse Electric Corporation, Pittsburgh/PA (US)

(72) Erfinder:
Ramaswamy Viswanathan, Pittsburgh/PA (US)
Thomas P. Sherlock, Lansdowne/PA (US)

(74) Vertreter:
A. Braun, Braun, Héritier, Eschmann AG, Patentanwälte, Basel

(54) Stahllegierung mit niedrigem Kohlenstoffgehalt.

(57) Die Stahllegierung enthält als wesentliche Bestandteile:

a) 0,10 bis 0,20 Gew.% Kohlenstoff
0,30 bis 0,80 Gew.% Mangan
1,00 bis 1,50 Gew.% Chrom
0,45 bis 0,65 Gew.% Molybdän
0,40 bis 0,75 Gew.% Silizium
0,01 bis 0,05 Gew.% Titan

b) Phosphor und/oder Antimon und/oder Zinn in einer Gesamtmenge von 0,01 bis 0,05 Gew.% und

c) als Rest mindestens zum grössten Teil Eisen.

Die Legierung hat eine hohe Kriech- und Bruchfestigkeit und eine hohe Bruchduktilität bei 538°C.

Eine hitzebeständige Legierung mit dieser Zusammensetzung und diesen Eigenschaften wird hergestellt, indem man einer Legierung, die

1) einen hohen Gehalt an Verunreinigungen von 0,01 bis 0,05 Gew.% Phosphor und/oder Antimon und/oder Zinn hat und

2) 0,10 bis 0,20 Gew.% Kohlenstoff
0,30 bis 0,80 Gew.% Mangan
1,00 bis 1,50 Gew.% Chrom
0,45 bis 0,65 Gew.% Molybdän
0,40 bis 0,75 Gew.% Silizium
und

3) als Rest mindestens zum grössten Teil Eisen enthält, vor dem Giessen 0,01 bis 0,05 Gew.% Titan und gegebenenfalls 0,004 bis 0,008 Gew.% Bor zusetzt.

PATENTANSPRÜCHE

1. Stahllegierung niedrigen Kohlenstoffgehalts mit hoher Kriech- und Bruchfestigkeit und hoher Bruchduktilität bei 538 °C, dadurch gekennzeichnet, dass die Legierung als wesentliche Bestandteile 0,10 bis 0,20 Gew.-% Kohlenstoff; 0,30 bis 0,80 Gew.-% Mangan; 1,00 bis 1,50 Gew.-% Chrom; 0,45 bis 0,65 Gew.-% Molybdän; 0,40 bis 0,75 Gew.-% Silizium; 0,01 bis 0,05 Gew.-% Titan; Phosphor und/oder Antimon und/oder Zinn in einer Gesamtmenge von 0,01 bis 0,05 Gew.-% und als Rest mindestens zum grössten Teil Eisen enthält.

2. Stahllegierung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Siliziumgehalt etwa 0,45 Gew.-% beträgt.

3. Stahllegierung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass sie ausserdem 0,004 bis 0,008 Gew.-% Bor enthält.

4. Stahllegierung nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass sie ungefähr 0,15 Gew.-% Kohlenstoff, ungefähr 0,60 Gew.-% Mangan, ungefähr 1,25 Gew.-% Chrom, ungefähr 0,50 Gew.-% Molybdän, ungefähr 0,03 Gew.-% Titan und 0,004 bis 0,006 Gew.-% Bor enthält.

5. Stahllegierung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass sie ungefähr 0,03 Gew.-% Phosphor und einen kombinierten Antimon- und Zinngehalt von weniger als 0,003 Gew.-% enthält.

6. Verfahren zur Herstellung einer hitzebeständigen Stahllegierung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass man einer Legierung, die einen hohen Gehalt an Verunreinigungen von 0,01 bis 0,05 Gew.-% Phosphor und/oder Antimon und/oder Zinn hat und 0,10 bis 0,20 Gew.-% Kohlenstoff, 0,30 bis 0,80 Gew.-% Mangan, 1,00 bis 1,50 Gew.-% Chrom, 0,45 bis 0,65 Gew.-% Molybdän, 0,40 bis 0,75 Gew.-% Silizium und als Rest mindestens zum grössten Teil Eisen enthält, vor dem Giessen 0,01 bis 0,05 Gew.-% Titan zusetzt.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass man der Legierung vor dem Giessen ausserdem 0,004 bis 0,008 Gew.-% Bor zusetzt.

Die Erfindung betrifft wärmefeste Stahllegierungen mit niedrigem Kohlenstoffgehalt.

Im Handel erhältliche Stahllegierungen mit niedrigem Kohlenstoffgehalt von der Art, die im allgemeinen 1,25% Cr, 0,5% Mo enthalten sollen, werden auf der Seite 467 des ASM «Metals Handbook», 8. Ausgabe, Band 1, 1961, erwähnt. Das Handbuch gibt die Nennzusammensetzung für die Legierung in der folgenden Form an: maximal 0,15% C; 0,45% Mn; 0,75% Si; 1,25% Cr; 0,5% Mo; Rest Fe. Eine Stahllegierung mit 1,25 Cr - 0,5 Mo wurde in den vergangenen Jahren in grossem Umfang als Material für Druckgefässe, Röhren, Rohre und Dampfturbinengehäuse benutzt. Zwar zeigen Legierungen von kommerzieller Qualität gute Hochtemperatureigenschaften, jedoch besteht eine potentielle Anwendungsgrenze für diese Legierung bei Temperaturen oberhalb von ungefähr 538 °C, weil dort das Problem des Kriechens auftritt. Wärmebehandlungsverfahren, die höhere Festigkeitswerte realisieren lassen, führen unglücklicherweise zu einem Verlust an Duktilität und machen den Stahl anfällig gegenüber Kerbungen. Verbesserungen in der Kriech- und Bruchfestigkeit würden es nicht nur ermöglichen, diese Legierung bei höheren Temperaturen zu verwenden, sondern würden auch die Dicken-Anforderungen vermindern, wodurch sich Einsparungen hinsichtlich Gewicht und Material ergeben. Kommerziell benutzte Stahllegierungen mit 1,25 Cr - 0,5 Mo enthalten zahlreiche versprödende Elemente, wie Phosphor, Antimon und Zinn, die bei hohen Temperaturen dazu neigen, sich an den Korngrenzen zu sammeln und Versprödung und nachfolgende Schwächung an den Grenzen bewirken. Die Hochtemperatureigenschaften der Legierung könnten verbessert werden, wenn diese Unreinheiten entfernt werden, jedoch ist es ökonomisch nicht möglich, bei der kommerziellen Stahlschmelzpraxis die versprödenden Unreinheitselemente bis zu den sehr niedrigen erforderlichen Pegeln zu entfernen.

Es ist bereits vorgeschlagen worden, Bor, Titan, Vanadium, Kupfer oder Columbium zu einer Legierung der eingangs genannten allgemeinen Art hinzuzufügen, um die Schlagfestigkeit bei niedrigen Temperaturen und die Schweissfestigkeit zu verbessern, siehe z. B. US-Patentschriften 3 251 682 und 3 288 600. Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, nämlich die Versprödung der 1,25 Cr - 0,5 Mo-Legierung bei hohen Temperaturen zu beseitigen, wird dadurch gelöst, dass gesteuerte Zusätze von Titan oder von Titan und Bor vorgenommen werden, um sowohl die Hochtemperatureigenschaften als auch die Raumtemperatureigenschaften der Legierung zu verbessern, selbst bei Anwesenheit von den versprödenden Unreinheiten Phosphor, Antimon und Zinn in dem Stahl.

Die vorliegende Erfindung liegt also in der Schaffung einer Stahllegierung mit niedrigem Kohlenstoffgehalt, die durch hohe Kriech- und Bruchfestigkeit sowie durch hohe Bruchduktilität bei 538 °C gekennzeichnet ist. Erfindungsgemäss wird die Aufgabe durch die Merkmale des Anspruchs 1 gelöst, also dadurch, dass die Legierung als wesentliche Bestandteile 0,10 bis 0,20 Gew.-% Kohlenstoff, 0,30 bis 0,80 Gew.-% Mangan, 1,00 bis 1,50 Gew.-% Chrom, 0,45 bis 0,65 Gew.-% Molybdän, 0,40 bis 0,75 Gew.-% Silizium, 0,01 bis 0,05 Gew.-% Titan, Phosphor und/oder Antimon und/oder Zinn in einer Gesamtmenge von 0,01 bis 0,05 Gew.-% und als Rest mindestens zum grössten Teil Eisen enthält.

Die Erfindung umfasst auch ein Verfahren zur Herstellung eines hitzefesten Stahls mit niedrigem Kohlenstoffgehalt, der durch hohe Kriech- und Bruchfestigkeiten sowie durch hohe Bruchduktilität bei 538 °C gekennzeichnet ist. Das Verfahren besteht darin, dass zunächst ein Stahl mit hohem Unreinheitsgrad - Phosphor, Antimon und/oder Zinn in einer Gesamtmenge von 0,01 bis 0,05 Gew.-% - vorgesehen ist, der ausserdem 0,10 bis 0,20 Gew.-% Kohlenstoff, 0,30 bis 0,80 Gew.-% Mangan, 1,00 bis 1,50 Gew.-% Chrom, 0,45 bis 0,65 Gew.-% Molybdän, 0,40 bis 0,75 Gew.-% Silizium, Rest Eisen, besteht, und dass dann zu der Legierung vor dem Giessen 0,01 bis 0,05 Gew.-% Titan hinzugefügt wird.

Vorzugsweise enthalten die Legierungen 0,004 bis 0,008 Gew.-% Bor.

Gemäss einer vorzugsweisen Ausführungsform der Erfindung liegen Kohlenstoff, Mangan, Chrom, Molybdän, Silizium, Titan und Bor in den folgenden ungefähren Gew.-%-Mengen vor: 0,15; 0,60; 1,25; 0,50; 0,45; 0,03; bzw. 0,004 bis 0,006.

Die Erfindung liefert eine Legierung, die grössere Härte und Zugfestigkeit bei Raumtemperatur zeigt, ohne dass eine Verschlechterung der prozentualen Elongation und der prozentualen Reduktionsfläche auftreten. Das Hinzufügen von Titan und Bor schafft eine Legierung, die eine erheblich verbesserte Bruchfestigkeit bei 538 °C (1000 °F) zeigt. Die erfindungsgemässe Legierung, die Titan oder Titan und Bor enthält, ergibt höhere Bruchduktilität bei Belastungsbruchtesten, die bei 538 °C für Zeitperioden bis zu 1000 Stunden durchgeführt wurden. Die vorteilhaften Effekte von Zugaben an Titan oder Titan und Bor treten unabhängig von den Mengen der in der Legierung vorhandenen versprödenden Unreinheiten, Phosphor, Antimon und Zinn, auf.

Weitere Vorteile und Einzelheiten der Erfindung ergeben sich aus der beiliegenden Beschreibung eines Beispiels in Verbindung mit den beigefügten Zeichnungen. Es zeigen:

Fig. 1 die Bruchbelastung in ksi (ksi = kilopounds per Square inch; 1 ksi = 70,3 kp/cm²) in Abhängigkeit von der Zeit

in Stunden (logarithmische Skala);

Fig. 2 eine Darstellung der Veränderung der prozentualen Flächenreduktion beim Bruch für die Legierungen als Funktion der logarithmisch aufgetragenen Zeit in Stunden bei 538 °C; und

Fig. 3 die logarithmisch aufgetragene minimale Kriechrate in Prozent pro Stunde für verschiedene Materialien in Abhängigkeit von der Belastung in ksi.

Beispiel

Um die Hochtemperatureigenschaften, insbesondere die Kriech-Bruchduktilität von 1,25 Cr - 0,5 Mo-Stahllegierungen mit niedrigem Kohlenstoffgehalt kommerzieller Qualität überprüfen zu können, wurden 8 Chargen mittels Vakuuminduktionsschmelzung hergestellt. Die chemische Analyse dieser Chargen ist in der Tabelle 1 weiter unten wiedergegeben. Die Charge VM 1706 stellte eine hochreine Kontrollegierung dar, die niedrige Mengen der Versprödungselemente Phosphor, Antimon und Zinn erhielt. VM 1711 und 1712 enthielten Titan bzw. Titan und Bor, mit Antimon und Zinn als prinzipielle Unreinheiten. VM 1701 enthielt ausschliesslich Bor, mit Zinn als prinzipieller Unreinheit. VM 1713 und 1717 liefert einen Vergleich zwischen einem Titanzusatz und einem Zusatz aus Titan plus Bor, mit Phosphor als prinzipieller Unreinheit. VM 1715 enthielt kein Titan oder Bor und wies hohe Pegel an Phosphor, Antimon und Zinn auf. VM 1716 enthielt in gleicher Weise hohe Mengen von versprödenden Unreinheiten plus einem Borzusatz.

Die unter Vakuum mittels Induktion geschmolzenen Chargen wurden zu Barren von 5×5 cm Grösse gegossen und danach bei 1093 °C zu einem quadratischen Lummenkopf mit einer Kantenlänge von 1,6 cm geschmiedet. Probestücke von dem Lummenkopf wurden bei 925 °C eine Stunde lang normalisiert und bei 675 °C eine Stunde lang getempert und dann in Wasser abgeschreckt. Ebenso wurde eine kommerzielle 1,25-Cr-0,5-Mo-Stahllegierung getestet und lag in der Form eines quadratischen Längsträger-Blockgiesslings mit 5 cm Kantenlänge vor. Die kommerzielle Legierung wurde bei 925 °C normalisiert und nachfolgend bei 704 °C getempert. Die niedrigere Tempertemperatur für die Laboratoriumsstähle wurde hauptsächlich deswegen gewählt, um höhere Festigkeitspegel zu erzeugen und dabei irgendwelche mögliche Versprödungseffekte in Kurzzeittesten zu beschleunigen. Von den Probestükken wurden nach der letzten Wärmebehandlung die Teststücke durch maschinelle Behandlung abgetrennt. Die Probenstücke besassen einen Mess- und Nutdurchmesser von 0,907 cm. Die Nut besass einen Wurzelradius von 0,0254 cm und einen grösseren Durchmesser von 1,27 cm. Diese Geometrie erzeugte einen theoretischen Belastungskonzentrationsfaktor von 4. Kriechteste wurden in Luft mit hebelarmartigen Maschinen bei 538 °C durchgeführt. Die Zugfestigkeits-Testdaten wurden bei Raumtemperatur erhalten.

Die Resultate aus den Zugfestigkeits- und Härtetesten bei Raumtemperatur für die verschiedenen Legierungen sind weiter unten in Tabelle 2 aufgelistet. Unter den Experimentierchargen zeigten VM 1712, 1713 und 1714 wesentlich erhöhte Festigkeit bei Raumtemperatur ohne erkennbare Verminderung der Duktilität, wodurch die vorteilhaften Effekte aufgrund der Titan- oder Titan plus Borzusätze angedeutet werden. Die Charge VM 1711 stellt demgegenüber eine Ausnahme dar und zeigt geringfügig geringere Festigkeitswerte bei Raumtemperatur im Vergleich zu dem Kontrollstahl VM 1706. Die Zugefestigkeitshöhen bei Raumtemperatur, die von VM 1712, 1713 und 1714 erreicht werden, stellen eine Verbesserung von zumindest 15% im Vergleich zu der Kontrollcharge VM 1706 dar, und ungefähr 35% im Vergleich zu kommerzieller Stahllegierung. Alle Zugfestigkeitsproben versagten im weichen Trägerbereich, wodurch angezeigt wurde, dass bei Raumtemperatur keinerlei Kerbempfindlichkeit vorhanden ist.

Tabelle

Chemische Zusammensetzung der Experimentierstähle

Stahl	PPM C	Mn	Cr	Mo	Si	Ti	B	P	Sb	Sn	S	N	O
VM 1706 (Kontrolle)	0,15	0,58	1,25	0,49	0,45	-	-	20	4	20	30	5	25
VM 1707*	0,16	0,58	1,22	0,49	0,45	-	45	20	5	320	32	20	23
VM 1711	0,16	0,59	1,17	0,49	0,45	300	-	20	100	330	25	10	15
VM 1712	0,16	0,56	1,24	0,49	0,45	300	60	10	93	280	27	6	23
VM 1713	0,16	0,55	1,24	0,49	0,45	300	-	300	3	21	26	14	37
VM 1714	0,16	0,57	1,24	0,50	0,45	300	55	320	2	23	26	8	25
VM 1715*	0,17	0,55	1,25	0,50	0,45	-	-	270	94	350	22	6	50
VM 1716*	0,16	0,56	1,25	0,49	0,45	-	40	300	97	325	26	7	33

*Vergleichsversuche

Tabelle 2

Ergebnisse der Härte- und Zugfestigkeits-Teste bei Raumtemperatur an Experimentierstählen

Stahl	Härte, R_B	Schliessliche Zugfestigkeit, ksi	0,2% Nachgiebigkeitsfestigkeit, ksi	Elongation %	Flächenreduktion %
VM 1706	94,5	92,3	74,4	26,9	73,9
VM 1707	94,0	92,3	74,4	25,7	70,9
VM 1711	91,5	88,0	69,4	19,0	71,6
VM 1712	97,0	102,7	88,9	24,9	64,8
VM 1713	97,0	105,7	90,6	22,0	63,4
VM 1714	98,6	108,4	93,7	20,4	65,5
VM 1715	94,6	92,7	71,8	25,3	69,8
VM 1716	92,5	94,0	85,8	26,3	69,2
kommerzielle 1,25 Cr - 0,5 Mo-Stahllegierung	-	77,5	54,0	29,0	71,9

Wie aus den obigen Tabellen entnommen werden kann, war die Charge VM 1714 bei Raumtemperatur die stärkste Legierung. VM 1714 enthielt 0,16% Kohlenstoff; 0,57% Mangan; 1,24% Chrom; 0,5% Molbydän; 0,45% Silizium; 300 ppm oder 0,03% Titan; 55 ppm oder 0,0055% Bor. Die Hauptunreinheit war Phosphor in einer Menge von 320 ppm (ppm = Teile pro 1 Million Teile) oder 0,032%, während der Rest im wesentlichen aus Eisen mit Spurenunreinheiten von Antimon, Zinn, Schwefel, Stickstoff und Sauerstoff war. Es scheint, dass Phosphor und Zinn die Festigkeit bei Raumtemperatur beeinflussen. VM 1714, das sowohl Titan als auch Bor mit hohem Phosphor- und niedrigem Zinngehalt enthielten, erreichte höhere Festigkeiten als die Charge VM 1712, die ähnliche Mengen von Titan und Bor und niedrigen Phosphor- und hohen Zinngehalt aufwies. Dieser offensichtliche Zusammenhang wird weiter verdeutlicht durch einen Vergleich von VM 1713 mit VM 1711, die Titan und kein Bor enthielten. VM 1713 mit hohem Phosphor und niedrigem Zinn- und niedrigem Antimongehalt war wesentlich fester als VM 1711, das wenig Phosphor und mässige Mengen von Antimon und hohe Mengen von Zinn enthielt.

Die verbesserten Bruchfestigkeitseigenschaften bei erhöhten Temperaturen für die erfindungsgemässen Legierungen können anhand der Figur 1 erläutert werden. Die Belastungsbruchteste wurden bei 538 °C an einer Kontrollegierung VM 1706 und an zwei Legierungen durchgeführt, die Titan- und Borzusätze enthielten, VM 1712 und VM 1714. Die Teste wurden unter Benutzung von vier Belastungshöhen durchgeführt, nämlich 35 ksi, 38 ksi, 44 ksi und 50 ksi (1 ksi = 70,3 kp/cm²). Die Legierung VM 1712 mit dem hohen Zinn-Antimon-Gehalt zeigte die besten Belastungsbrucheigenschaften in diesem Test. VM 1714, das einen hohen Phosphorgehalt aufwies, zeigte ebenfalls gute Belastungsbrucheigenschaften, die oberhalb der der hochreinen Kontrollegierung VM 1706 lagen. Aus der Fig. 1 ist zu erkennen, dass der Zusatz von Titan und Bor zu einer wesentlichen Verbesserung der Bruchfestigkeit führt, selbst in Anwesenheit von versprödenden Unreinheiten. Es wird angenommen, dass die 10 000-Stunden-Bruchfestigkeit der Chargen VM 1712 und 1714 zumindest 20% höher liegen, verglichen mit der Kontroll-Stahllegierung VM 1706.

Figur 2 erläutert die beobachteten Variationen der prozentualen Flächenverminderung beim Bruch für die Legierungen als Funktion der logarithmisch aufgetragenen Zeit bis zum Bruch bei 538 °C, wobei die Zeit in Stunden angegeben ist. Diese Teste zeigen die verbesserte Bruchduktilität als Ergebnis der Titan- bzw. Titan- plus Borzusätze. Die Kurve für die Kontroll-Stahllegierung VM 1706 wird gekennzeichnet durch einen anfänglichen Bereich konstanter Duktilität, gefolgt durch einen Bereich von sich vermindernder Duktilität, wenn t_r ungefähr 100 Stunden überschreitet. Für die erfindungsgemässen Legierungen liegen die Duktilitätswerte in einem engen Bereich von 80 bis 90% und zeigen keine Tendenz zur Abnahme bei Zeiten, die über 1000 Stunden liegen. Beispielsweise besass die Charge VM 1712 eine Flächenreduktion von 81% selbst bei 2300 Stunden. Es ist bemerkenswert, dass die Legierungen VM 1707 und 1716, die nur Bor mit hohen Unreinheitspegeln enthielten, einen sehr schnellen Abfall der Duktilität nach 100 Stunden zeigten, einen schnelleren Abfall als die Kontrollcharge VM 1706. VM 1715 war ähnlich in der Zusammensetzung wie die Kontrollcharge, enthielt aber höhere Pegel an Phosphor, Antimon und Zinn, was offensichtlich den schnelleren Abfall der Duktilität nach 100 Stunden verursachte.

Es wird angenommen, dass die Unreinheitselemente sich an den Korngrenzen bei hohen Temperaturen sammeln und eine Schwächung der Korngrenzen bewirken und so die Kriech-Bruchduktilität der Legierung verkleinern. Dieser Effekt wird durch die Zusätze von Titan und Bor beseitigt, die die Empfindlichkeit gegenüber zwischen den Korngrenzen auftretenden Frakturen selbst bei Anwesenheit dieser Korngrenzenversprödern vermindern.

Die Veränderung der logarithmisch aufgetragenen minimalen Kriechrate ist in Figur 3 in Abhängigkeit von der Belastung für eine Temperatur von 538 °C für mehrere Chargen aufgetragen. Die minimalen Kriechraten sind einheitlich um zumindest einen Faktor von 3 sowohl für VM 1712 als auch für VM 1714 kleiner, verglichen mit der Kontrollegierung VM 1706, wodurch bedeutsame Verbesserungen aufgrund der Titan- und Borzusätze angezeigt werden. Der Effekt des Titanzusatzes allein - bei Abwesenheit von Bor - ist noch nicht ganz verständlich und ändert sich mit der Art und der Menge der übrigen vorhandenen Unreinheiten. Z. B. zeigte VM 1711, dass Titan in Anwesenheit von Antimon und Zinn aufwies, grundsätzlich niedrigere Kriechfestigkeit, während VM 1713, das Titan enthielt und einen hohen Phosphorgehalt aufwies, durchgehend verbesserte Kriechfestigkeit verglichen mit der Kontrollegierung VM 1706 besass.

Die 1,25-Cr-0,5-Mo-Stahllegierungen mit niedrigem Kohlenstoffgehalt werden im allgemeinen bei hoher Temperatur und hoher Belastung verwendet. Eine derartige Anwendung ist die

für die Gehäuse von Dampfturbinen. Diese Gehäuse werden gegossen und unterliegen im Gebrauch den hohen Drücken des überhitzten Dampfes und hohen Temperaturen im Bereich von 538 bis 593 °C. Um festzustellen, ob die Eigenschaften der Gusslegierung vergleichbar mit den gschmiedeten Proben sind, wurden zusätzliche Teste an gegossenen Proben durchgeführt. Die zu dieser Bestimmung verwendeten Materialien bestanden aus Halbbarren, die bei entsprechenden Chargen der vorangegangenen Untersuchung von geschmiedeten Proben übriggeblieben waren. Die Wärmebehandlung und die Testprozeduren, die an diesen gegossenen Proben durchgeführt wurden, waren identisch zu denen, die vorher an den geschmiedeten Proben durchgeführt wurden. Die Tabelle 3 weiter unten gibt die Ergebnisse der Kriechteste bei 538 °C und 35 ksi an geschmiedeten und an gegossenen Proben wieder, und zwar für die Chargen VM 1706, 1713, 1712 und 1714, zusammen mit der kommerziellen Legierung.

Tabelle 3

Ergebnisse der Kriechteste bei 538 °C und 35 ksi

Stahl	Zustand	Endgültige Härte (VHN)	Kriechrate (%/Stunde)	t_r (Stunde)	% Flächenminderung bei Bruch
VM 1706	geschmiedet	202	0,0033	1111	63
(Kontrolle)	gegossen	198	0,003	664	79
VM 1713	geschmiedet	246	0,0013	1156	83
(Ti)	gegossen	224	0,0042	571	83
VM 1712	geschmiedet	233	0,00045	2306	81
(Ti + B)	gegossen	218	0,0024	1030	83
VM 1714	geschmiedet	251	0,0011	1301	84
(Ti + B)	gegossen	237	0,0009	1511	73
kommerziell	gegossen	-	-	1000	88

Die in Tabelle 3 wiedergegebenen Ergebnisse zeigen, dass sowohl im geschmiedeten als auch im gegossenen Zustand die Titan und Bor enthaltenden Stähle, VM 1712 und 1714, gegenüber der Kontrollcharge VM 1706 und der kommerziellen Legierung überlegen sind hinsichtlich Kriechfestigkeit, schliessliche Zugfestigkeit, Bruchfestigkeit und Duktilität.

Basierend auf den obigen Ergebnissen ist zu erkennen, dass bei 1,25-Cr-0,5-Mo-Stahllegierungen mit niedrigem Kohlenstoffgehalt durch die Zugabe von gesteuerten Mengen von Titan oder von Titan und Bor bedeutsame Verbesserungen sowohl hinsichtlich der Raumtemperaturfestigkeit als auch hinsichtlich der Belastungs-Bruchfestigkeit bei 538 °C erreicht werden kann. Die Daten zeigen, dass Anstiege in der Zugfestigkeit und der Bruchfestigkeit miteinander im Zusammenhang stehen. Da die Kriechfestigkeit gleichfalls zur Belastungs-Bruchfestigkeit in Beziehung steht, können die drei Parameter unter dem Begriff «Festigkeit» zusammengefasst werden, um die Diskussion der Ergebnisse zu erleichtern. Die Testergebnisse von VM 1712 und 1714 zeigen deutliche Verbesserung der Festigkeit der Stahllegierung aufgrund des Zusatzes von Titan und Bor, unabhängig von der vorhandenen Menge an versprödenden Elementen Phosphor, Antimon und Zinn. VM 1713, das hohen Titan- mit hohem Phosphorgehalt aufweist, zeigt auch eine verbesserte Festigkeit gegenüber VM 1706 (Kontrolle). VM 1711, das Titan mit hohen Unreinheitsgehalten an Antimon und Zinn aufweist, besitzt andererseits niedrigere Raumtemperaturfestigkeit als die Kontrollegierung VM 1706.

Die Ergebnisse zeigen, dass die erfindungsgemässe Legierung eine verbesserte Bruchfestigkeit bei 538 °C und verbesserte Raumtemperatur-Zugfestigkeit aufweist, mit keinem begleitenden Verlust an Duktilität bei der kombinierten Hinzufügung von Titan und Bor. Weiterhin führen Zusätze von Titan oder Titan und Bor zu bedeutsamen Verbesserungen bei der Belastungs-Bruchduktilität bei 538 °C trotz der Anwesenheit von grossen Mengen von versprödender Unreinheiten wie Antimon, Phosphor und Zinn in dem Stahl.

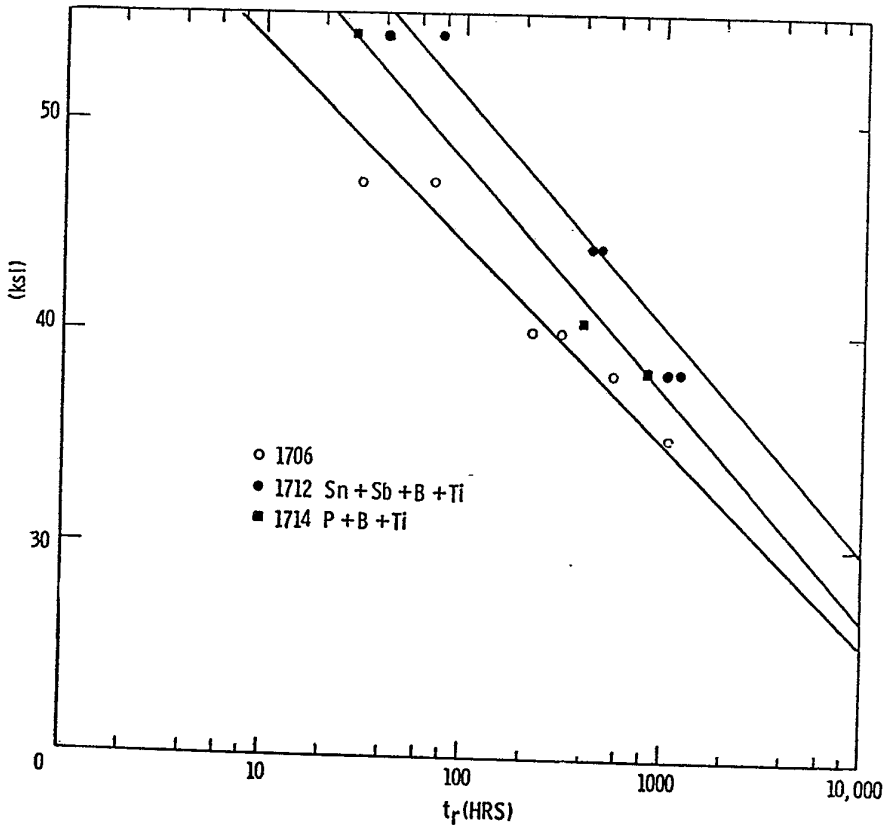

50
40
30
0
(ksi)
10
100
1000
10,000
t_r(HRS)
○ 1706
● 1712 Sn + Sb + B + Ti
■ 1714 P + B + Ti

FIG. 1

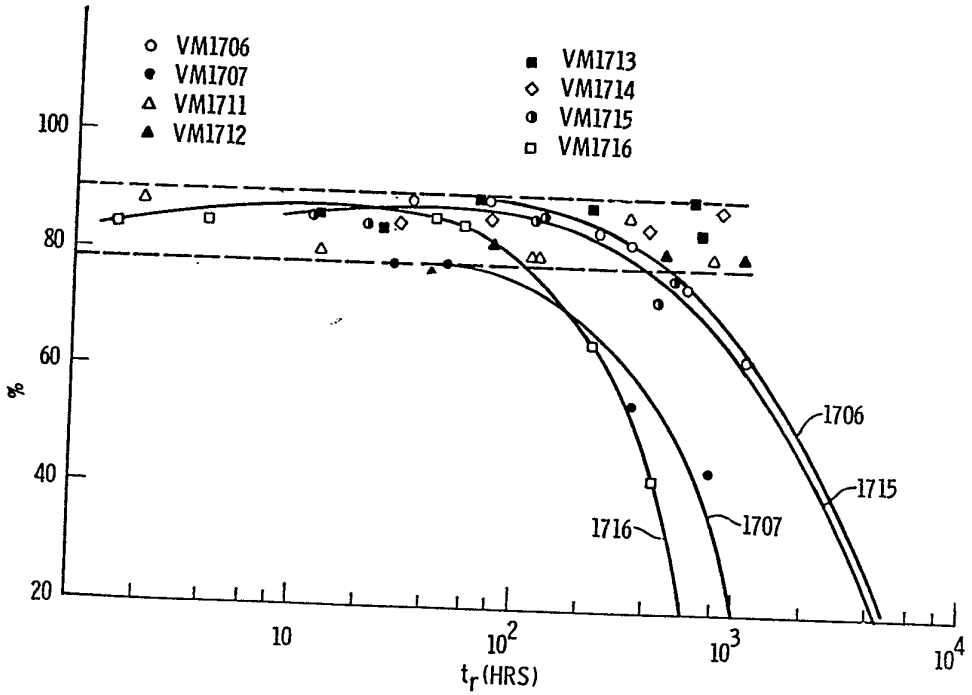

○ VM1706
● VM1707
△ VM1711
▲ VM1712
■ VM1713
◇ VM1714
◐ VM1715
□ VM1716
100
80
60
40
20
%
10
10^2
10^3
10^4
t_r(HRS)
1706
1715
1707
1716

FIG. 2

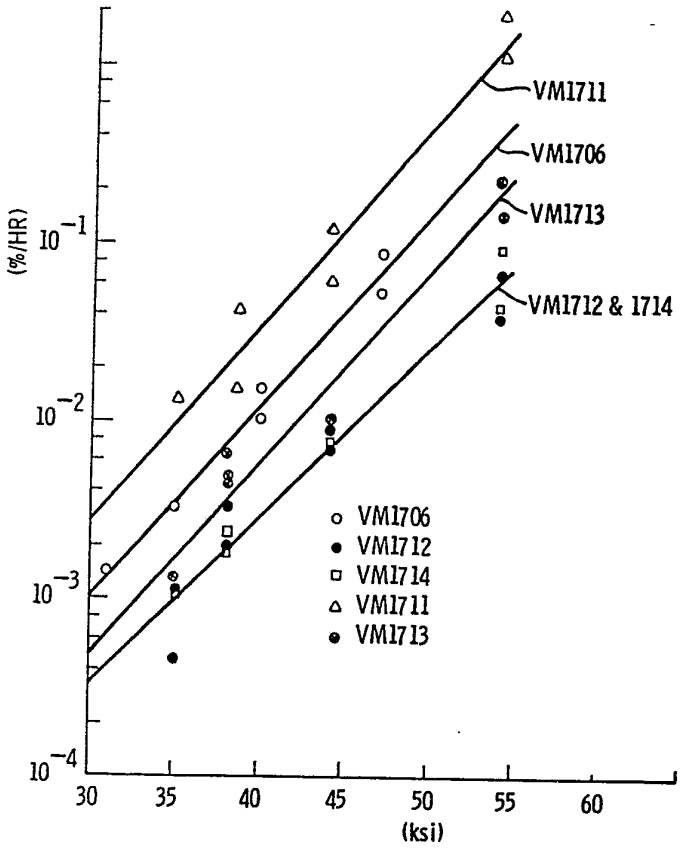

VM1711
VM1706
VM1713
VM1712 & 1714
(%/HR)
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
VM1706
VM1712
VM1714
VM1711
VM1713
30
35
40
45
50
55
60
(ksi)

FIG. 3