

NITRIERBARE TITANSTÄHLE

Von

L. GILLEMOT und M. TÖMÖRY

Institut für Mechanische Technologie der Technischen Universität, Budapest

(Eingegangen am 2. Oktober 1957)

1. Einleitung

Die Dimensionierung der einer Wechsellast ausgesetzten Maschinenteile erfolgt heute schon fast ausschließlich unter Berücksichtigung der Dauerfestigkeit. Es ist bekannt, daß die Dauerfestigkeit von vielen Einflußgrößen bestimmt wird; außer von der chemischen Zusammensetzung des Werkstoffes und der Fertigungstechnologie (Schmieden, Walzen, Wärmebehandlung, spanabhebende Bearbeitung in allen ihren Phasen) wird jedoch der stärkste Einfluß vom Spannungszustand des betreffenden Maschinenteiles ausgeübt. In der Praxis erweist sich als kaum möglich, Maschinenteile, die einer Dauerbeanspruchung ausgesetzt sind, ohne irgendwelche Einkerbung, Keilnuten, Ölbohrung oder andere Spannungskerben zu entwerfen. Ist die Oberfläche glatt, dann erhöht sich die Dauerfestigkeit der Stähle proportional oder nahezu proportional zur Zugfestigkeit. Ohne einen theoretischen Zusammenhang zwischen den statischen Festigkeitswerten (d. h. Zugfestigkeit und Streckgrenze) und der Dauerfestigkeit zu finden, hat die Praxis bereits bewiesen, daß zwischen den aus dem Zugversuch bestimmten Festigkeitswerten und der an polierten Probestäben mit glatter Oberfläche bestimmten Dauerfestigkeit Näherungsbeziehungen bestehen. Derartige Näherungsbeziehungen wurden von zahlreichen Forschern auf rein empirischem Wege aufgestellt. Einige dieser Näherungsformeln [1, 2, 3] werden im folgenden wiedergegeben:

$$\sigma_{bw} = 0,285 (\sigma_s + \sigma_B)$$

$$\sigma_{bw} = 0,25 (\sigma_s + \sigma_B) + 5$$

$$\frac{\sigma_{bw}}{\sigma_B} \cong 0,50$$

Infolge ihrer erfahrungsmäßigen Grundlage ergeben diese Formeln nur Orientierungswerte, doch kann aus ihrer Änderungstendenz ersehen werden, daß sich die Dauerfestigkeit mit steigender Zugfestigkeit erhöht. Die zunehmende Tendenz der Dauerfestigkeit gilt jedoch nur für jenen Dauerfestigkeitswert, der an Probestäben mit glatt polierter Oberfläche bestimmt wurde.

Ist nun irgend eine Querschnittsänderung von der Form einer scharfen Einkerbung am Probestab vorzufinden, dann kann im Wert der Dauerfestigkeit als Funktion der Zugfestigkeit keine solche eindeutig zunehmende Tendenz festgestellt werden. Die Verhältnisse sind, nach D. K. BULLENS [4], in Abb. 1 anschaulich dargestellt. An der Abszissenachse des Diagramms sind die Zugfestigkeitswerte verschiedener Stahlsorten, an der Ordinatenachse hingegen die aus Umlaufbiegeversuchen bestimmten Schwingungsfestigkeitswerte derselben

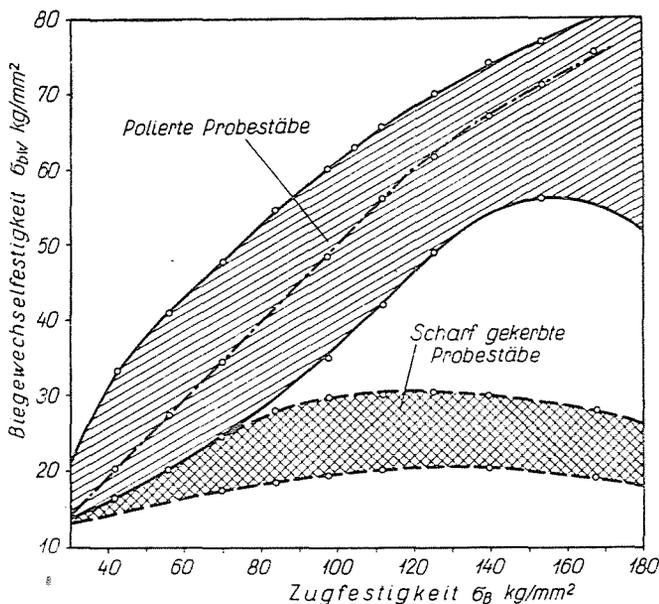


Abb. 1. Verlauf der Dauerfestigkeit der Stähle als Funktion der Zugfestigkeit, für polierte und scharf eingekerbte Probestäbe (nach D. K. BULLENS)

Stähle aufgetragen. Die Dauerfestigkeit der polierten Probestäbe zeigt — zwar mit erheblicher Streuung — eine zunehmende Tendenz bis zu einer Zugfestigkeit von 140—150 kg/mm^2 . Bis etwa 120—130 kg/mm^2 Zugfestigkeit kann auch eine gewisse Erhöhung der Dauerfestigkeit festgestellt werden, doch wird die Zunahme bei den eingekerbten Probestäben viel mäßiger wie bei den polierten Probestäben. Hieraus folgt, daß einzig und allein die Erhöhung der statischen Festigkeit bei den mit scharfen Einkerbungen hergestellten Maschinenteilen die Frage der Dauerfestigkeit nicht löst und daß die Verwendung von hochfesten vergüteten Stahlsorten keine besonderen Vorteile bei der Dimensionierung solcher Maschinenteile bietet. Aus dem Diagramm kann festgestellt werden, daß die Dauerfestigkeit einer Stahlsorte niedriger Härte und Festigkeit bei scharfer Einkerbung zwischen 14 und 18 kg/mm^2 schwankt, während sich

die Dauerfestigkeit eines vergüteten Stahls mit 120 kg/mm^2 Festigkeit innerhalb der Grenzen von 18 bis 28 kg/mm^2 bewegt.

Für die Verminderung der Abmessungen der Maschinenteile bedeutet also die Verwendung von hochfesten Vergütungsstählen zweifellos einen Vorteil, jedoch wird dadurch die hohe Festigkeit der vergüteten Stähle, besonders aber die durch Vergütung erreichbare hohe Streckgrenze überhaupt nicht ausgenützt. Die Streckgrenze eines Vergütungsstahles mit 120 kg/mm^2 Zugfestigkeit beträgt im vergüteten Zustand etwa $90\text{--}100 \text{ kg/mm}^2$. Zugleich erreicht aber die Dauerfestigkeit bei eingekerbten Teilen höchstens $18\text{--}28 \text{ kg/mm}^2$. Man kann also einen solchen Stahl auch unter den günstigsten Umständen nur bis etwa $\frac{1}{3}\text{--}\frac{1}{4}$ seiner Streckgrenze beanspruchen. Infolge der Vergütung zu einer hohen Festigkeit wird jedoch die Kerbschlagzähigkeit eines jeden Stahles — im Verhältnis zum weichgeglühten Zustand — vermindert, wodurch zugleich die Empfindlichkeit gegen dynamische Beanspruchungen gesteigert wird.

Mit Rücksicht auf den ungünstigen Einflusses der Einkerbungen auf die Dauerfestigkeit wurden überall in der Welt Untersuchungen angestellt, durch welche fertigungstechnischen Verfahren die infolge Einkerbungen eintretende Verringerung der Dauerfestigkeit zumindest eingeschränkt werden könnte. Von den zu diesem Zweck entwickelten Verfahren hat sich eine nachträgliche Verfestigung der dauerbeanspruchten Flächen entweder durch Kaltverformung oder durch Wärmebehandlung am besten bewährt. Eine Kaltverfestigung der Oberfläche kann entweder durch Kugelstrahlen oder durch Glattwalzen erzielt werden. In beiden Fällen entsteht auf der Oberfläche des betreffenden Maschinenteiles eine verdichtete, verfestigte Schicht, wodurch die Dauerfestigkeit — im Verhältnis zum Ausgangszustand — um $24\text{--}30\%$ erhöht wird [5]. Ein gemeinsamer Nachteil beider Verfahren besteht darin, daß sie gerade bei scharf eingekerbten Maschinenteilen nicht verwendbar sind oder aber kompliziert gestaltete Spezialwerkzeuge benötigen. Das Glattwalzen oder Kugelstrahlen der vollkommen glatten Maschinenelemente bereitet keine besonderen Schwierigkeiten, doch ist z. B. zur Verfestigung einer Wellenbohrung ein kegelliger, den Bohrungsabmessungen entsprechend bemessener Dorn erforderlich, der — durch die Bohrung gezogen — die gewünschte Oberflächenverfestigung auch im Bohrungsinnen sichern kann.

Eine andere Möglichkeit zur Erhöhung der Dauerfestigkeit besteht in der Oberflächenwärmebehandlung. Ist der Maschinenteil so gestaltet, daß durch Brennhärten oder durch Induktionshärten eine gleichmäßig durchhärtete Schicht entsteht, dann kann die Dauerfestigkeit durch diese Behandlung selbst bei eingekerbten Teilen um $100\text{--}120\%$ erhöht werden [6], so daß sich die Dauerfestigkeit des eingekerbten Teiles bereits der Dauerfestigkeit polierter Probe­stäbe nähert. Sowohl das Induktionshärten als auch das Brennhärten können jedoch nur bei bestimmter Teilgestaltung vorteilhaft zur Verwendung gelangen ;

auf der Oberfläche entsteht eine äußerst harte Schicht, die in manchen Fällen Vorteile bieten mag, oft aber überflüssig ist.

Unabhängig von der Gestalt kann die Dauerfestigkeit der eingekerbten Maschinenteile durch Nitrieren erhöht werden, worauf MAILÄNDER [7], WIEGAND [8], LACHTIN [9], KONTOROWITSCH [10] und andere Forscher, in der ungarischen Fachliteratur von J. DAUDA [11], hingewiesen haben. Durch Nitrieren wird die Dauerfestigkeit um 80—100% erhöht, und die Dauerfestigkeit eines eingekerbten Maschinenteils oder Probestückes wird nach Nitrieren die an polierten Probestäben gemessene Dauerfestigkeit völlig oder annähernd erreichen. Ob zwar die Gestaltung des betreffenden Teiles bei der Verwendung des Nitrierverfahrens keine Rolle spielt, bedeutet das Nitrieren dennoch eine Beschränkung, hinsichtlich der Wahl des Werkstoffes, da nur solche Stähle durch Nitrieren wärmebehandelt werden können, die wirksame nitridbildende Elemente, d. h. Chrom, Aluminium, Molybdän, Vanadin usw. enthalten. Außer den Beschränkungen betreffs der Werkstoffzusammensetzung hat das Nitrierverfahren noch den enormen Nachteil, daß zur Bildung einer, den Anforderungen der Praxis entsprechenden nitrierten Oberflächenschicht eine Wärmebehandlung von mehreren Tagen benötigt wird. Andererseits bietet das Nitrieren — im Gegensatz zu den anderen Wärmebehandlungsverfahren — den Vorteil, daß es bei verhältnismäßig niedriger Temperatur, etwa bei 480—550° C durchgeführt wird und dadurch die Gefahr einer Wärmebehandlungsverziehung gering ist. Zusammenfassend kann jedoch festgestellt werden, daß sich das Nitrieren in der Industrie zur Erhöhung der Dauerfestigkeit dauerbeanspruchter Maschinenteile nicht durchsetzen konnte.

Im Falle von nicht vergütbaren Stählen niedriger Härte kann zur Erhöhung der Dauerfestigkeit gleichfalls eine Kaltverfestigung der Oberfläche oder aber eine Aufkohlung der Oberflächenschicht angewandt werden. Die Aufkohlung erhöht die Dauerfestigkeit der glatten, polierten Probestäbe um etwa 30%, die der eingekerbten Probestäbe jedoch um etwa 50% [12, 13]. Als Nachteil des Einsatzens kann erwähnt werden, daß seine Dauer 5 bis 8 Stunden beträgt, die Temperatur — der Stahlzusammensetzung entsprechend — um etwa 900° C schwankt, so daß mit einer starken Verziehung des einsatzgehärteten Teiles gerechnet werden muß. Infolge der Einsatzbehandlung wird zugleich die Kerbschlagzähigkeit des Werkstoffes erheblich herabgesetzt.

Auf Grund dieser Betrachtungen haben sich die Verfasser die versuchsmäßige Ermittlung solcher Stahlsorten zum Ziel gesetzt, die bei einer, für die übrigen Wärmebehandlungsverfahren angenommenen Behandlungsdauer, d. h. binnen 2—8 Stunden durch Nitrieren mit einer Oberflächenschicht entsprechender Stärke versehen werden können.

2. Die Einwirkung des Titans auf die Nitrierbarkeit der Stähle

Infolge der hohen Stickstoffaffinität des Titans konnte angenommen werden, daß titanhaltige Stähle sehr gut nitrierbar sind. Diese Wirkung wird auch dadurch verstärkt, daß das Titan mit dem Kohlenstoff ein äußerst stabiles Titankarbid bildet und in dem Falle, wenn in der Legierung das Verhältnis von Titan zu Kohlenstoff etwa dem stöchiometrischen Verhältnis der Verbindung Titankarbid entspricht, d. h. etwa 4 : 1 wird die metallographische Stahlstruktur rein aus in Ferrit eingebettetem Titankarbid bestehen. Die Stickstoffdiffusion wird durch den Kohlenstoff verhindert [14], das Verhalten der Ti-legierten Stähle wird also analog zum Verhalten der kohlenstoff-freien bzw. kohlenstoffarmen weichen Stähle.

Um diese Behauptung zu beweisen, haben wir während unserer Versuche Armco-Eisen mit 0,04% C-Gehalt (bei 600° C) 5 Stunden lang nitriert, worauf eine Nitrierschicht von ungefähr 0,65 mm Stärke und 580 HV Vickershärte erhalten wurde. Es war also zu erwarten, daß bei Titan-Stählen, wo der Ti-Gehalt einen Teil oder den ganzen Kohlenstoffgehalt in der Form von Titankarbid gebunden hält, in kurzer Zeit Oberflächenschichten gleicher Härte erreicht werden können. Stähle jedoch, die mehr Titan enthalten, als zur Bildung des Titankarbids nötig ist, können infolge der hohen Härte des Titanitrids in kurzer Zeit auf höchste Härte nitriert werden. Das Verhältnis $Ti/C = 4$ kann also als ein Grenzwert vom Standpunkt des Nitrierschicht-Charakters betrachtet werden.

Tabelle I

Chemische Zusammensetzung der untersuchten Titanstähle

Nr.	C%	Ti%	$\frac{Ti}{C}$
589	0,23	0,24	1,04
592	0,29	0,32	1,10
590	0,19	0,26	1,37
593	0,30	0,53	1,78
6	0,09	0,20	2,23
57	0,21	0,55	2,64
56	0,18	0,55	3,08
7	0,09	0,29	3,22
58	0,18	0,58	3,23
591	0,19	0,72	3,79
600	0,20	0,90	4,5
4	0,05	0,32	6,4
518	0,14	0,92	6,5
5	0,05	1,03	20,6

Während der Versuche wurden von uns insgesamt 14 verschiedene titanlegierte Stähle verschiedener chemischer Zusammensetzung untersucht, wobei das Verhältnis Ti/C von 1,04 bis 20,6 verlief. Die chemische Zusammensetzung der Versuchsschmelzen kann aus den Analysenergebnissen auf Tab. I ersehen werden.

Während der Versuche wurde die Nitrierbehandlung bei drei verschiedenen Temperaturen (550—600—650° C), bei einer Dauer von 1 bis 7 Stunden in einer Mischgasatmosphäre mit 80% Stickstoff- und 20% NH₃-Gehalt durchgeführt. Bei Verwendung dieser Gasmischung ergibt sich nämlich bei gleicher Temperatur und gleicher Behandlungsdauer, besonders bei Titanstählen, eine stärkere Schicht als bei der Behandlung in reinem Ammoniak [15]. Unseren vorher geschilderten Betrachtungen gemäß konnten die untersuchten 14 Stahl-

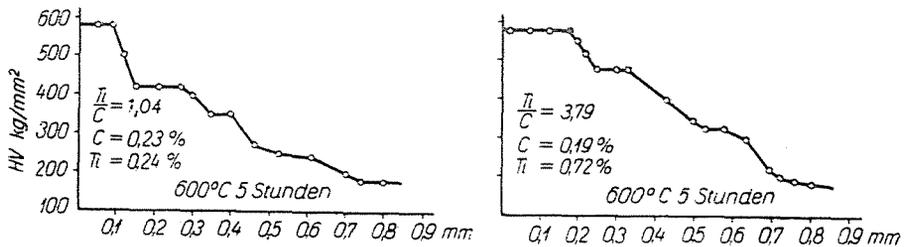


Abb. 2. Härteverteilung von nitrierten $\frac{1}{2}$ Werkstücken im Falle von $Ti/C < 4$

sorten ihrem Wesen nach in zwei Gruppen eingegliedert werden. Bei Stahlarten mit einem Ti/C-Verhältnis unter 4 können bei gleicher Temperatur und gleicher Behandlungsdauer, selbst bei Veränderungen der chemischen Zusammensetzung innerhalb weiter Grenzen, ungefähr die gleiche Schichttiefe und die gleiche größte Härte erreicht werden, u. zw. praktisch unabhängig von der chemischen Zusammensetzung. Wie aus Abb. 2 ersichtlich ist der Verlauf der Schichthärte* als Funktion der Schichttiefe für einen Stahl mit $Ti/C = 1,04$ und für einen mit $Ti/C = 3,79$ praktisch übereinstimmend. Die Schichthärte nach Vickers beträgt $HV = 580$ und die mit einer fünfstündigen Behandlung erreichbare Schichtstärke ist etwa 0,7 mm. Der Übergang zwischen Grundstruktur und der Nitrierschicht mit höchster Härte verläuft stetig. Mit Rücksicht auf den stetigen, ohne scharf abgetrennte Grenze verlaufenden Übergang wird hier unter Schichtstärke die Tiefe jenes Punktes verstanden, an dem die Schichthärte der Grundstruktur gleich wird. Die Stähle mit einem Ti/C-Verhältnis über 4 ergeben — vom Titangehalt abhängig — eine hochharte Schicht mit $HV = 800—1400$ nach Vickers. Selbst wenn das

* Die Härtewerte wurden mit Mikrohärtprüfer nach Hanemann mit 50 g Belastung bestimmt

Verhältnis Ti/C nur ein wenig über 4 steigt, weist der Verlauf der Härtekurven einen wesentlichen Unterschied zu den mit $Ti/C < 4$ gekennzeichneten Stahlsorten bestimmten Kurven. Der Übergang zwischen Nitrierschicht und Grund-

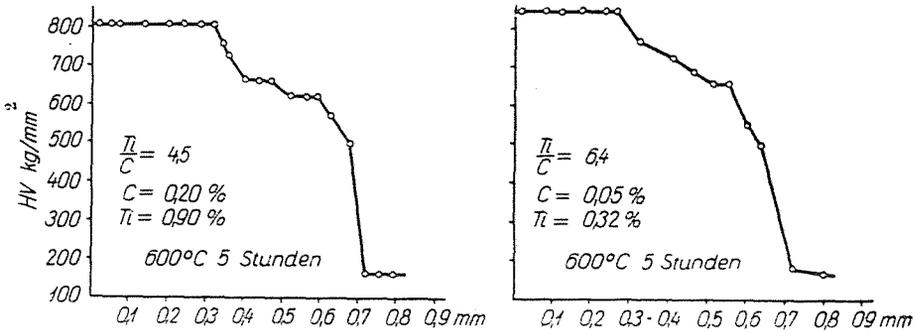


Abb. 3. Härteverteilung von nitrierten Werkstücken im Falle von $Ti/C > 4$

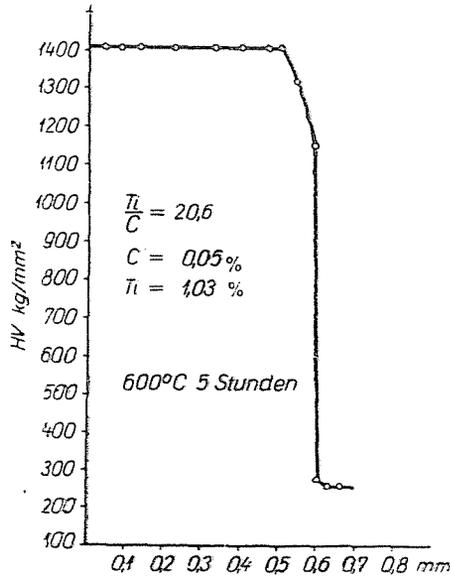


Abb. 4. Härteverteilung von nitrierten Werkstücken im Falle von $Ti/C \geq 4$

struktur verläuft äußerst steil, u. zw. um so steiler, je größer das Verhältnis Ti/C (Abb. 3 und 4).

Die Meßergebnisse sind in Abb. 5 zusammengefaßt, wobei die Ordinate die Schichthärte (nach fünfständigem Nitrieren bei $600^{\circ} C$) als Funktion des Ti/C -Verhältnisses bezeichnet. Wie aus Abb. 2 ersichtlich, kann bei einem Verhältniswert bis $Ti/C = 4$ nur von der größten Härte der Nitrierschicht

gesprochen werden und diese Härte hat der Abbildung gemäß einen praktisch konstanten Wert für $Ti/C = 1$ bis etwa $Ti/C = 4$. Bei den Stahlsorten mit $Ti/C > 4$ ist die Härte in der ganzen Schicht praktisch konstant und nimmt mit zunehmenden Ti/C -Verhältnis bis $HV = 1400$ (nach Vickers) zu.

Auf Grund des Gesagten können die Titanstähle — soweit es die Nitrierbarkeit betrifft — in zwei Gruppen eingeteilt werden. Stähle mit $Ti/C < 4$ sind infolge ihrer zähweichen Nitrierschicht mit stetigem Übergang besonders zur Fertigung von Maschinenteilen geeignet, bei denen keine hohe Oberflächenhärte gefordert wird, wie sie also z. Zt. aus kohlenstoffarmen oder vergüteten Stählen hergestellt werden. Stähle mit $Ti/C > 4$ scheinen dank ihrer hohen

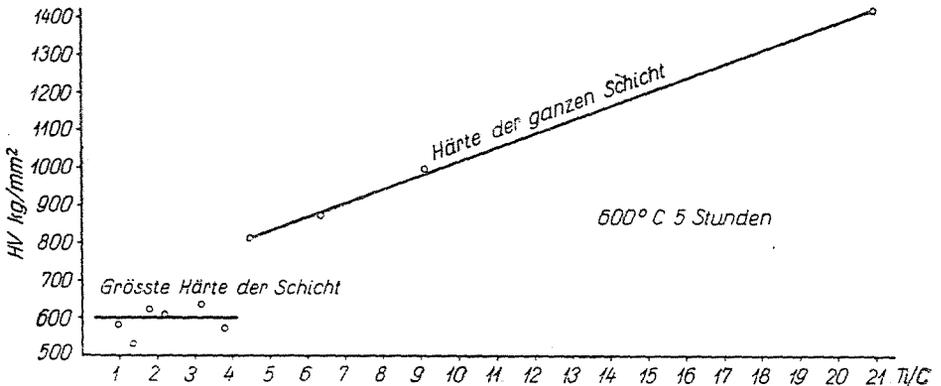


Abb. 5. Härte der an Titanstählen hergestellten Nitrierschicht als Funktion von Ti/C

Oberflächenhärte an Stelle von einsatzhärtbaren kohlenstoffarmen Stählen verwendbar zu sein oder auf solchen Gebieten (z. B. bei der Fertigung von Lehren), wo eine hohe Oberflächenhärte gefordert wird. Die letzterwähnten Stahlsorten sollen in einer später zur Veröffentlichung gelangenden Abhandlung ausführlich beschrieben werden. Hier soll lediglich betont werden, daß durch eine fünfständige Behandlung bei $600^\circ C$ eine Härte erreicht werden kann, die der Härte der Einsatzhärteschicht nicht nachsteht, ja sie sogar übertrifft. Dabei bringt das Nitrieren einen äußerst wichtigen Vorteil mit sich, nämlich die besonders schwache Verziehung nach der Wärmebehandlung, im Gegensatz zur starken Verwerfung nach dem Einsatzhärten.

Unseren Messungen gemäß sind die beim Nitrieren hervorgerufenen Verziehungen so gering, daß das Schleifübermaß bei nitrierten Teilen — zwar von der Konfiguration des Teiles abhängig — um etwa eine Größenordnung kleiner gewählt werden kann als bei den Einsatzstählen, in Einzelfällen können sogar die nitrierten Teile ohne Nachbearbeitung zur Verwendung gelangen.

Es scheint uns besonders vorteilhaft, daß bei Titanstählen die notwendige Behandlungsdauer zur Erreichung der erforderlichen Schalenstärke viel kürzer

ist als bei den übrigen z. Zt. gebrauchten Nitrierstählen. Das Aufkohlen und Einsatzhärten ist zwar ein viel rascheres Verfahren, als das bisher angewandte Nitrieren, doch ist die zum Nitrieren der Titanstähle nötige Behandlungszeit noch kürzer als die Einsatzhärtezeit. Das kann aus Abb. 6 ersehen werden, wobei die durch Nitrieren erreichbare Schichtstärke als Funktion der Behandlungsdauer aufgetragen wurde. Aus dem Diagramm können die von uns entwickelten Titanstähle mit den bisher zur allgemeinen Verwendung gelangten Chrom-Aluminium-Molybdän-Stählen der Nitrierbarkeit nach verglichen werden. Die Angaben des Diagramms können verallgemeinert werden, da bei allen von uns verwendeten bzw. entwickelten Titanstählen etwa die gleiche Schicht-

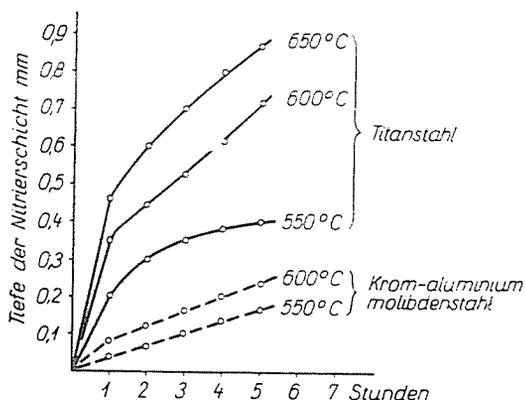


Abb. 6. Tiefe der Nitrierschicht als Funktion von Zeit und Temperatur

stärke als Funktion der Zeit erreicht werden kann. Im Diagramm wurde die Kurve der Titanstähle nur bis zur fünften Stunde ermittelt, da bei den Chrom-Aluminium-Molybdän-Stählen etwa 50 Stunden zum Erreichen jener Schichtstärke [16] benötigt werden, die beim Titanstahl bei gleicher Temperatur nach fünfständigem Nitrieren erhalten wird. Demgemäß ist die Nitrierdauer des Titanstahles im Verhältnis von 1 : 10 kürzer als für die bisher verwendeten Cr-Al-Mo-Stähle.

Es ist auch bemerkenswert, daß die zum Nitrieren dieser Stähle erforderliche Zeit noch etwas kürzer ist als die Zementationszeit der Einsatzstähle. Infolgedessen kann der nitrierte Titanstahl sowohl vom technologischen wie auch vom wirtschaftlichen Standpunkt mit den Einsatzstählen verglichen werden, u. zw. mit dem Ergebnis, daß sich das Nitrieren der Titanstähle als vorteilhafter erweist, nachdem es bei einer niedrigeren Temperatur durchgeführt wird, daß die erreichbare Schichtstärke der der Einsatzhärteschicht gleich ist, oder sie sogar übertrifft und die Verziehungsfahr wesentlich verringert wird.

Die der Bedingung $Ti/C < 4$ zusammensetzungsmäßig entsprechenden Stähle wurden von uns sowohl auf statische als auch auf Dauerfestigkeit unter-

sucht. Die Festigkeitsangaben der untersuchten Stahlsorten wurden in Tab. II zusammengefaßt.

Tabelle II
Festigkeitsangaben einiger untersuchten Titanstähle

Nr.	$\frac{\text{Ti}}{\text{C}}$	σ_s Kg/mm ²	σ_B Kg/mm ²	δ_{10} %	ψ %	A_K mKg/cm ²
589	1,04	33,7	51,9	25,7	66,8	14,8
592	1,10	31,1	54,4	25,2	62,8	11,5
590	1,37	28,4	48,5	24,0	70,8	16,6
593	1,78	34,7	56,1	23,5	65,2	12,9

In Tab. II wurden die Festigkeitswerte nur bis zu einem Zusammensetzungsverhältnis $\text{Ti/C} = 1,78$ dargestellt, da die Festigkeitswerte für $\text{Ti/C} = 4$ am niedrigsten sind [17]. Nachdem laut Abb. 5 die Schichthärte praktisch konstant ist, bieten die Stahlsorten mit einem Titangehalt von $\text{Ti/C} = 1,78$ bis $\text{Ti/C} = 4$ weder festigkeitsmäßig noch der Nitrierbarkeit nach Vorteile und können deshalb außer acht gelassen werden.

Wie aus der Tabelle festzustellen ist, können die Schwankungen der Festigkeitswerte innerhalb der genannten Zusammensetzungsgrenzen als unbedeutend betrachtet werden; für die dargestellten vier Stahlsorten beträgt die Streckgrenze etwa 30 kg/mm², die Zugfestigkeit etwa 52 kg/mm².

Zur Bestimmung der Dauerfestigkeit wurden zum Teil zylindrische Probestäbe mit 8 mm Durchmesser, zum Teil solche mit 14 mm Durchmesser verwendet. Die Dauerversuche wurden mit der praktisch annehmbaren schärfsten Einkerbung, u. zw. mit Kerben von 55° Flankenwinkel und 0,22 mm Abrundungsradius, etwa dem Whitworthgewinde entsprechend durchgeführt. Der Kerb war bei den 8-mm-Probestäben 1 mm und bei den 14-mm-Probestäben 2,5 mm tief. Hierdurch wurde der Durchmesser der Probestäbe an der Kerbstelle bis 6 bzw. 9 mm vermindert. Diese Kerbgestaltung schien uns auch deshalb als zweckmäßig, weil in den ausländischen Literaturangaben Kerben dieser oder annähernd ähnlicher Form zur Bestimmung der Dauerfestigkeit anderer Stahlsorten verwendet wurden, und solcherart die an Titanstählen erhaltenen Dauerfestigkeitswerte, unabhängig von den eigenen Kontrollversuchen, zugleich unmittelbar mit den Ergebnissen verschiedener im Ausland durchgeführten Dauerfestigkeitsversuchen verglichen werden konnten.

Die Ergebnisse der Dauerversuche wurden in Abb. 7 zusammengefaßt. In dieser Abbildung werden vergleichsweise die Dauerfestigkeitswerte von polierten glatten bzw. eingekerbten Probestäben drei verschiedener Stahlsorten auf Grund von Literaturangaben gezeigt [18]. Im Diagramm bezeichnet 1. einen einfachen unlegierten Stahl, 2. einen Nickelstahl und 3. einen Chrom-Nickel-

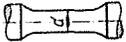
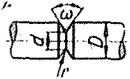
Nr.	Zusammensetzung	σ_a Kg/mm ²	σ_B Kg/mm ²		σ_D Kg/mm ²				$\frac{\sigma_D}{\sigma_a}$ % glatt		σ_D Kg/mm ²				$\frac{\sigma_D}{\sigma_a}$ % gekerbt
					glatt poliert	4 St. nitr.	7 St. nitr.	4 Tage nitr.			gekerbt poliert	4 St. nitr.	7 St. nitr.	4 Tage nitr.	
1.	C = 0,44, Mn = 0,74 vergütet	59	74	d = 6,5 mm	42				71	$\omega = 60^\circ$ r = 0,25 mm D = 7,5 mm d = 6,5 mm	18				30,5
2.	C = 0,40, Mn = 0,74, Ni = 3,48 patentiert	74	94	d = 5,4 mm	56				76	$\omega = 60^\circ$ r = 0,25 mm D = 7,5 mm d = 5,4 mm	18				24
3.	C = 0,37, Mn = 0,75, Cr = 0,65, Ni = 1,33 vergütet	56	77	d = 6,5 mm	43				77	$\omega = 60^\circ$ r = 0,25 mm D = 7,5 mm d = 6,5 mm	16				28,5
4.	MCr 140 vergütet	70	100	d = 8 mm	48				68	$\omega = 55^\circ$ r = 0,22 D = 14 mm d = 9 mm	14				20
5.	C = 0,18, Mn = 0,7, Ti = 0,58 normalisiert	38	55	d = 8 mm	31	42	48	126	$\omega = 55^\circ$ r = 0,22 mm D = 8 mm d = 6 mm	16,5	21	27			71
5/h										$\omega = 55^\circ$ r = 0,22 mm D = 14 mm d = 9 mm	12	24	25		66
6.	C = 0,25, Mn = 0,23, Cr = 1,40, Al = 1,11 normalisiert	56	72		39		55	98	„scharf“ gekerbt r = 0,3 mm D = 11 mm d = 7,4 mm	22			36	64	

Abb. 7. Dauerfestigkeit von vergüteten Stählen und von Ti-Stählen im glatten und eingekerbten Zustand

Stahl. Da bei der Bestimmung der Dauerfestigkeit die Abmessungen des Probestabes sowie die Bauart der zum Versuch verwendeten Prüfmaschine immer einen gewissen Unsicherheitsfaktor bedeuten, wurden zur Kontrolle die statischen und Dauerfestigkeitsangaben eines, den ungarischen Normen entsprechenden, Cr-Mn-Stahles der Normbezeichnung MCR 140 mit denselben Prüfgeräten und mit derselben Probestabform bestimmt, wie es auch bei der Bestimmung der Dauerfestigkeit der Titanstähle erfolgte. Der erste Teil der Tabelle enthält die Angaben der polierten, glatten Probestäbe ohne Kerben. Der Durchmesser der untersuchten Probestäbe schwankt zwischen 5,4 und 8 mm, und innerhalb dieser Grenzen können die Meßergebnisse mit größter Genauigkeit verglichen werden. Aus der Tabelle kann festgestellt werden, daß die Streckgrenze und die Zugfestigkeit des Titanstahles am niedrigsten unter allen untersuchten Stählen liegt; die Dauerfestigkeit im polierten Zustand und ohne Einkerbung beträgt 31 kg/mm², was zwar höher ist als gewöhnlich bei Stählen solcher niedrigen Festigkeit, doch noch immer unter der etwa 42—56 kg/mm² hohen Dauerfestigkeit der hochfesten Stahlsorten 1—4 bleibt. Hingegen steigt die Dauerfestigkeit des Titanstahls nach sehr kurzer Nitrierdauer (nach 4 bzw. 7 Stunden) auf 42 bzw. 48 kg/mm², d. h. nach einer Nitrierbehandlung von 7 Stunden ist sie im uneingekerbten Zustand schon höher als die Dauerfestigkeit der vergüteten Stähle, allein die Dauerfestigkeit des patentierten Nickelstahls Nr. 2 liegt etwas höher. Der Größenordnung nach wird also die Dauerfestigkeit des Titanstahls nach einer vier- bis siebenstündigen Nitrierbehandlung — im polierten Zustand — der Dauerfestigkeit der vergüteten Stähle gleich. In Verbindung mit der Zeitangabe von 4—7 Stunden soll bemerkt werden, daß diese Wärmebehandlungsdauer ungefähr mit der zum Härten und Anlassen der übrigen Stahlsorten nötigen Frist übereinstimmt. Die Anwendung des Nitrierens bedeutet also keine Verlängerung der zur Wärmebehandlung erforderlichen Zeit.

Der linke Teil der Tabelle wurde noch mit dem Verhältnis der Dauerfestigkeit und der Streckgrenze ergänzt. Bei polierten Probestäben aus Vergütungsstahl beträgt die Dauerfestigkeit rund $\frac{2}{3}$ der Streckgrenze (64 bis 77%). Bei den Titanstählen erreicht die Dauerfestigkeit im nitrierten Zustand 126% der im unnitrierten Zustand gemessenen Streckgrenze. Dieser überraschend hohe Verhältniswert kann dadurch erklärt werden, daß während des Nitrierens die statische Streckgrenze ebenfalls erhöht wird; doch schien die Angabe der Dauerfestigkeit in bezug auf die in unnitriertem Zustand gemessene Streckgrenze deshalb zweckmäßig, weil auch in der ersten Rubrik die Streckgrenze des unnitrierten Titanstahls der der Vergütungsstähle gegenübergestellt wurde.

Die Streckgrenze des Titanstahles im nitrierten Zustand kann durch den Biegeversuch ermittelt werden, was aber einen um 25% erhöhten Wert im Verhältnis zu der beim Zugversuch ermittelten Streckgrenze ergibt. Die aus dem Biegeversuch ermittelte Streckgrenze des betreffenden Titanstahls beträgt

— an einem Probestab mit 10 mm Durchmesser und nach vierstündigem Nitrieren gemessen — 60 kg/mm². Die Dauerfestigkeit der Probestäbe nach vierstündigem Nitrieren beläuft sich auf 42 kg/mm² und die aus dem Biegeversuch ermittelte Streckgrenze von 60 kg/mm² gibt nach einer Verringerung um 25% die aus dem Zugversuch bestimmbare Streckgrenze. Demgemäß erreicht die aus dem Zugversuch ermittelte Streckgrenze des Titanstahles nach vierstündigem Nitrieren etwa 42—45 kg/mm², d. h. man kann in grober Annäherung annehmen, daß die aus dem Umlaufbiegeversuch ermittelte Schwingungsfestigkeit mit dem aus dem Zugversuch bestimmten Streckgrenzenwert übereinstimmt.

Während also die vergüteten Stähle bei der Dimensionierung nur etwa bis zu $\frac{2}{3}$ Teil der Streckgrenze ausgenutzt werden können, kann die Dauerfestigkeit der Titanstähle im nitrierten Zustand dem aus dem statischen Versuch ermittelten Streckgrenzenwert gleich angenommen werden.

Die Vorteile der Titanstähle treten bei einer Untersuchung dieser Stähle im eingekerbten Zustand noch besser hervor. Die zweite Hälfte der Tabelle enthält die im eingekerbten Zustand gemessenen Dauerfestigkeitswerte. Für jede Stahlart wurde der Flankenwinkel des Kerbes sowie der Abrundungsradius angegeben. Die Kerben an den in den Rubriken 1—3 und 5 zusammengefaßten Stählen sind praktisch gleich. Die von uns untersuchten Stahlarten Nr. 4 und 5 zeigten den kleinsten Abrundungsradius auf, so daß unsere Meßergebnisse gewissermaßen ungünstigeren Bedingungen entsprechen als die ausländischen Meßergebnisse, die mit 1 bis 3 bezeichnet wurden. Es soll auch betont werden, daß unsere Probestäbe der Meßreihen 4 und 5/b mit tieferen Einkerbungen ausgeführt wurden als die der Stahlarten 1 bis 3 und demgemäß mit den unter 1—3 angeführten Angaben nicht unmittelbar vergleichbar sind. Aus den untereinander vergleichbaren Meßergebnissen kann die Folgerung gezogen werden, daß die Dauerfestigkeit des unlegierten Stahles, des Ni-Stahles und des Cr-Ni-Stahles bei einem tiefen Kerb 16—18 kg/mm², bei dem unbehandelten Titanstahl 16,5 kg/mm² beträgt. Dadurch wird erneut die aus Abb. 1 ersichtliche Tatsache bewiesen, daß im Falle von scharfen Kerben die Dauerfestigkeit der weichen, ungehärteten Stähle nicht niedriger ist als die der hochfesten vergüteten Stähle. Der Mn-Cr-Stahl Nr. 4 und der Titanstahl Nr. 5/b sind untereinander unmittelbar vergleichbar, woraus zu ersehen ist, daß bei solchen außerordentlich scharfen Einkerbungen die Dauerfestigkeit des Cr-Mn-Stahles die des Titanstahles nicht ganz 20% übersteigt, obwohl seine Streckgrenze mehr als 1,9mal höher liegt als die des Ti-Stahles. Durch Nitrieren der Titanstähle wird aber ihre Dauerfestigkeit erheblich erhöht. Nach einer Nitrierbehandlung von 7 Stunden erhöht sich die Dauerfestigkeit der Probestäbe mit weniger scharfen Einkerbung auf 27 kg/mm² und die der äußerst scharf eingekerbten Probestäbe Nr 5/b auf 25 kg/mm².

In der letzten Spalte der Tabelle wurde das Verhältnis der im eingekerbten Zustand gemessenen Dauerfestigkeit zur Streckgrenze (dem Zugversuch gemäß)

angegeben. Die Dauerfestigkeit der vergütbaren Stähle (Nr. 1 bis 3) beträgt im eingekerbten Zustand 24—30,5% der Streckgrenze, während das gleiche Verhältnis für Titanstähle 71% erreicht. Für einen Cr-Mn-Stahl mit sehr tiefer Einkerbung ist dieses Verhältnis 20% (Nr. 4), für den Ti-Stahl mit gleicher Einkerbung rund 66% (Nr. 5/b). Es kann also auf Grund der Tabelle festgestellt werden, daß im eingekerbten Zustand die Dauerfestigkeit der nitrierten Titanstähle — bei Einwirkung eines Kerbes, der viel schärfer ist als die in der Praxis vorkommenden Kerben — 25—27 kg/mm² erreicht, während die eines hochfesten Vergütungsstahles nur 16—18 kg/mm² beträgt. Je schärfere Kerben bei der Gestaltung eines Maschinenteiles unvermeidbar verwendet werden müssen, desto vorteilhafter wird die Verwendung der nitrierten Titanstähle. In einem glatten polierten Maschinenteil erhält man also mit Titanstahl praktisch die gleiche Dauerfestigkeit wie mit den hochfesten vergüteten Stahlsorten, im eingekerbten Zustand aber ist die Dauerfestigkeit der nitrierten Ti-Stähle um rund 50% höher als die eines beliebigen hochfesten Stahles. Dementsprechend können in jenen Maschinenelementen, bei denen Einkerbungen oder Spannungsanhäufungen vorkommen, die Titanstähle die vergüteten Stahlsorten nicht nur ersetzen, sondern sie können sich sogar besser bewähren.

Vom Standpunkt der Dimensionierung muß noch besonders erwähnt werden, daß die Dauerfestigkeit eines äußerst scharf eingekerbten nitrierten Titanstahlteiles nur wenig von der Dauerfestigkeit des polierten Ti-Stahl-Probestabes abweicht. Die Dimensionierung wird also erheblich vereinfacht, da die Kerbwirkung nicht gesondert in Betracht gezogen werden muß; man kann durch die Anwendung eines Sicherheitsfaktors der Größenordnung 0,7—0,8 die zulässigen Beanspruchungen sowohl für die scharf eingekerbten wie auch für die glatt polierten Maschinenteile ermitteln.

Schließlich wurden die Angaben der Titanstähle mit den Ergebnissen verglichen, die mit den in Rubrik 6 der Tabelle angegebenen nitrierbaren Cr-Al-Stählen gewonnen wurden. Bei den Cr-Al-Stählen erhält man im eingekerbten Zustand nach dem Nitrieren eine höhere Dauerfestigkeit als bei den unnitrierten Titanstählen. Die Streckgrenze und die Zugfestigkeit der hochlegierten Cr-Al-Stähle liegt sogar im unbehandelten Zustand wesentlich höher als die Festigkeitswerte der Titanstähle. Dagegen ist aber zum Erreichen der in der Tabelle für den eingekerbten Zustand angegebenen Dauerfestigkeit von 36 kg/mm² eine Nitrierdauer von 4 Tagen nötig, was bisher gerade die Verbreitung dieser Stähle für dauerbeanspruchte Maschinenteile verhindert hat. In Verbindung mit der Nitrierung der Cr-Al-Stähle und anderer Nitrierstähle muß jedoch betont werden, daß die so erhaltene Nitrierschicht sehr hart und äußerst spröde ist. Die spröde Nitrierschicht neigt sehr zur Rißbildung. Ist aber die Oberflächenschicht infolge Rißbildung nicht mehr stetig, so ist sie als Schutz gegen Dauerbeanspruchung noch weniger wertvoll, als wenn der Stahl überhaupt nicht nitriert wäre. So hat z. B. WIEGAND [19] gezeigt, daß

die Dauerfestigkeit eines Probestabes mit gerissener Oberfläche um 72% im Verhältnis zum Ausgangszustand verringert wird. Da die Rißgefahr bei den beim Nitrieren eine hartspröde Schicht bildenden Stählen immer besteht, können die durch Nitrieren gebotenen Vorteile nicht mit voller Sicherheit ausgenutzt werden. Dagegen sind die auf Titanstählen (bei $Ti/C < 4$) hergestellten Nitrierschichten plastisch und — wie aus Abb. 8 ersichtlich — ein Probestab

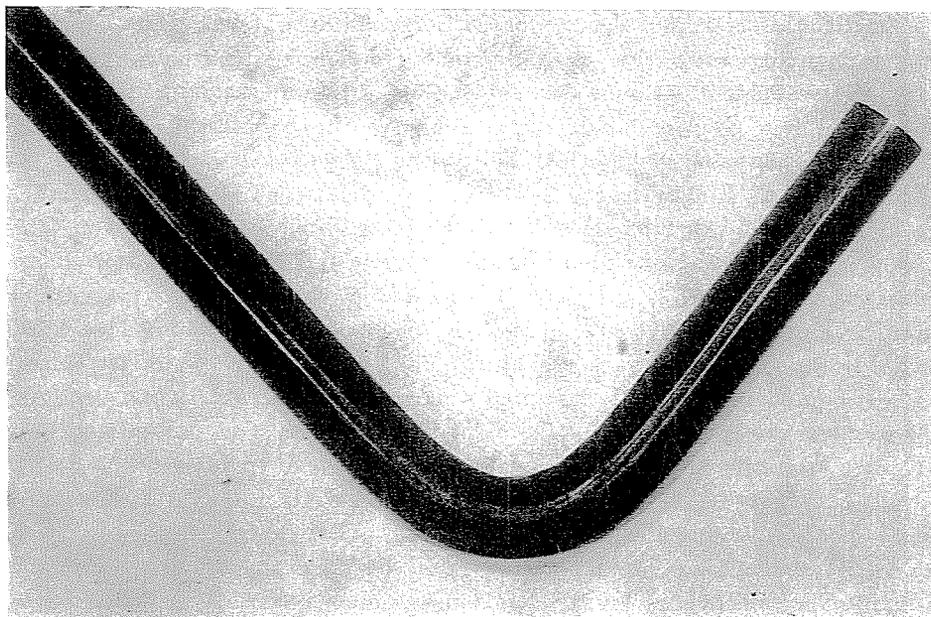


Abb. 8. Biegeprobestab auf niedrige Härte nitriert

mit 30 mm Durchmesser kann nach vierstündiger Nitrierbehandlung ohne Rißgefahr um mehr als 90° durchgebogen werden. Die nitrierten Titanstähle bieten also gerade gegen eine Rißbildung in der Oberflächenschicht praktisch vollen Schutz und ermöglichen nach erfolgter Nitrierung im Notfall sogar eine Kaltverformung des solcherart nitrierten Maschinenteiles.

3. Schlußfolgerungen

Zusammenfassend soll festgestellt werden, daß auf Einwirkung der Titanlegierung die Nitrierbarkeit des Stahles in hohem Maße erhöht wird und im Laufe von rund 5 Stunden an Titanstählen Nitrierschichten von gleicher Stärke hergestellt werden können wie bei einer Behandlungsdauer von 50 Stunden im Falle der übrigen, bereits bekannten Nitrierstähle. Diese Eigenschaft der Titanstähle ermöglicht eine betriebsmäßige Anwendung des Nitrierverfahrens

u. zw. können der chemischen Zusammensetzung des Stahles entsprechend entweder die aufgekohlten und einsatzgehärteten Stähle durch Nitrierstähle ersetzt werden oder aber die einer Dauerbeanspruchung ausgesetzten hochfesten Vergütungsstähle. Für den Ersatz der Einsatzstähle können jene Titanstähle zur Verwendung gelangen, bei denen das Verhältnis Ti/C über 4 liegt, da bei diesen die erreichbare Härte sich als Funktion der Zusammensetzung ändert und desto höher ist, je höher das Verhältnis Ti/C.

Bei Stahlsorten, bei denen das Ti/C-Verhältnis unter 4 bleibt, entsteht infolge der Nitrierung eine verhältnismäßig weiche Nitrierschicht und die Härte dieser Schicht ist von der chemischen Zusammensetzung des Stahles zwischen weiten Grenzen unabhängig. Diese weiche Nitrierschicht kann kalt verformt werden und neigt selbst bei einem Biegewinkel von 90° nicht zur Ribbildung. Auf Einwirkung des Nitrierens erhöht sich die Dauerfestigkeit der Titanstähle in erheblichem Maße. Nach einer Nitrierbehandlung von 4 bis 7 Stunden kann erreicht werden, daß die Dauerfestigkeit des nitrierten Titanstahls mit der Dauerfestigkeit jedes hochfesten, hochlegierten und vergüteten Stahles zumindest gleichwertig wird. Je schärfer der Werkstoff eingekerbt wurde, desto höher steigt — verhältnismäßig — die Dauerfestigkeit infolge des Nitrierens. In der Praxis kommen schärfere Kerben, als die bei den Versuchen zur Verwendung gelangten, nicht vor. Mit den von uns gebrauchten V-Kerben ergibt der nitrierte Titanstahl eine um rund 50% höhere Dauerfestigkeit als die Vergütungsstähle. Bei Einwirkung von Kerben, die ihrem Charakter gemäß eine Zwischenstufe zwischen der glatt polierten Oberfläche und dem V-Kerb darstellen, liegt die Dauerfestigkeit des nitrierten Titanstahles, laut unserer unveröffentlichten Versuchsergebnisse, immer höher als die eines beliebigen hochfesten vergüteten Stahles.

Als Regel kann demnach gesagt werden, daß der nitrierte Titanstahl an polierten Probestäben gemessen zumindest gleichwertig, an eingekerbten Probestäben gemessen aber — von der Schärfe der Einkerbung abhängig — stets besser ist als irgendein beliebiger hochfester Vergütungsstahl. Da die Behandlungsdauer für das Nitrieren bei diesen Stahlsorten auf 4—7 Stunden verkürzt wird, beträgt die Wärmebehandlungsdauer im allgemeinen nicht mehr als die bei den vergüteten Stählen zum Härten und Anlassen nötige Zeit.

Soweit die Härteverziehungen und ähnliche Verformungen in Betracht gezogen werden, ist der nitrierte Titanstahl auch theoretisch unbedingt vorteilhafter, da die Nitriertemperatur unter den kritischen Umwandlungstemperaturen liegt und im Laufe der Wärmebehandlung nirgends ein Abschrecken verwendet werden muß. Obwohl die Verziehung stets auch von der Form des Werkstückes abhängig ist, kann man zweifellos feststellen, daß im Falle von Werkstücken gleicher Konfiguration immer die Verziehung eines nitrierten Stahlstückes kleiner wird als die eines gehärteten und angelassenen Werkstückes. Demgemäß kann in den meisten Fällen das Schleifübermaß für eine

Bearbeitung nach der Wärmebehandlung entweder sehr gering gewählt oder aber das Nachschleifen aus dem Fertigungsvorgang völlig ausgeschaltet werden.

Die Verwendung der nitrierten Titanstähle für dauerbeanspruchte Maschinenteile darf also als vorteilhaft beurteilt werden, z. T. wegen der Ersparung an edlen Legierungselementen, z. T. kann es aber einen erheblichen Vorteil bedeuten, daß die Bearbeitung des Stahles im ausgeglühten oder normalisierten Zustand erfolgen kann und nach der abschließenden Wärmebehandlung, d. h. nach dem Nitrieren, keine weitere kostspielige Nachbearbeitung benötigt wird, wenn aber eine solche doch zur Verwendung gelangt, ist ihr Ausmaß viel geringerer als im Falle der vergüteten Stähle.

Zusammenfassung

Die in der Praxis im allgemeinen übliche Oberflächenschichtstärke kann durch Nitrieren bei Titanstählen in kurzer Zeit hergestellt werden. Vom Standpunkt der Nitrierung bedeutet das Verhältnis $Ti/C = 4$ einen Grenzwert. Bei den Stählen, bei denen $Ti/C < 4$, kann durch die Nitrierung eine verhältnismäßig weiche Nitrierschicht hergestellt werden, und zwar mit einem stufenweisen Übergang zum Kern hin; bei den Stählen $Ti/C > 4$ hingegen ist die entstandene Schicht von hoher Härte; die Härte wächst dem Verhältnis Ti/C entsprechend. Die Dauerfestigkeit der Titanstähle mit weicher Nitrierschicht ist im polierten Zustand gleichwertig mit der Dauerfestigkeit der hochfesten vergüteten Stähle, bei Probestäben mit scharfer Kerbe ist die Dauerfestigkeit jedoch um etwa 50% größer als die Dauerfestigkeit der vergüteten Stähle.

Literatur

1. STRIBECK, R.: Z. VDI 67 (1923).
2. HOUDREMONT, E.—MAILÄNDER, R.: Stahl u. Eisen 49, 833 (1929).
3. GROVER, H. J.—GORDON, S. A.—JACKSON, L. R.: Fatigue of Metals and Structures. London 1956.
4. BULLENS, D. K.: Steel and Its Heat Treatment (1948).
5. HORGER, O. J.—NEIFERT, H. R.: Effect of Surface Conditions on Fatigue Properties. Surface Treatment of Metals, ASM Symposium (1941).
6. CASE, S. L.—BERRY, J. M.—GROVER, H. J.: ASM Transactions 24, 667—683 (1952).
7. MAILÄNDER, R.: Z. VDI 77, Nr. 10 (1933).
8. WIEGAND, H.: Oberfläche und Dauerfestigkeit. Berlin 1941.
9. LACHTIN, JU. M.: Termitscheskaja Obrabotka. Maschgis. (1948).
10. SERENSEN, S. B.—KONTOROWITSCH, I. E.: Wijnjanie asotirawanija na ustalostnuju protschnost konstrukcionnoj stali. Oborongis (1947).
11. DAUDA J.: Gép, 1—2 (1957).
12. GÖBEL, E. F.—MARFELS W.: Bestimmung der zulässigen Spannung dauerbeanspruchter Baustähle. Konstruktion. S. 381 (1951).
13. GÖBEL, E. F.—MARFELS, W.: Die Oberflächenhärtung und ihre Berücksichtigung bei der Gestaltung. Springer-Verlag, Berlin 1953.
14. EILENDER, W.—MEYER, O.: Archiv f. d. Eisenhüttenwesen 7 (1931).
15. TÖMÖRY, M.: Kohászati Lapok 5 (1956).
16. LACHTIN, JU. M.: Asotirowanie stali, Maschgis. (1943).
17. Dr. GILLEMOT, L.: MTA Müsz. Oszt. Közleményei X, 1—2 (1953).
18. DOLAN, T. J.—YEN, C. S.: ASTM Proceedings, Vol. 48, 664—695 (1948).
19. WIEGAND, H.: Härtereitechnische Mitteilungen, 166—185 (1942).

Prof. L. GILLEMOT }
M. TÖMÖRY } Bp. XI. Bertalan u. 6.