620.178.16:539.375.6

Untersuchung über die Abrasion vom Stahl bei Warmverformung*

Teil I Herstellung der Abriebprüfmaschine und die Abrasion der Kohlenstoffstähle bei hoher Temperatur

von Eiichi TSUJI**

Der Zweck vorliegender Untersuchung ist, die Erscheinung der Abrasion bei Warmverformung zu untersuchen. Für diesen Versuch wurde eine geeignete Abriebprüfmaschine hergestellt, bei welcher eine erwärmte stillstehende Probe gegen eine rotierende Probe gedrückt wurde.

Als Werkstoff der erwärmten Probe wurden geglühte Kohlenstoffstähle mit 0,35, 0,8 und 1,0% C gewählt. Die rotierende Probe bestand aus geglühtem Kohlenstoffstahl mit 0,76% C.

Die Versuche wurden zunächst bei Raumtemperatur durchgeführt. Dann wurde die stillstehende Probe auf 500°C bzw. 700°C erhitzt. Nach Vorversuchen wurden eine Belastung von 11,5 kg/cm² und eine Abriebgeschwindigkeit von 1,16 m/s gewählt. Nach der Prüfung wurden der Zustand und das Profil der Abrieboberfläche bzw. die Form und die Bestandteile des Abriebstaubes beobachtet.

1. Einleitung

Bei vorliegender Untersuchung sollen die Erscheinung der Abrasion vom Stahl bei Warmverformung (z. B. Warmschmieden, Warmstrangpressen oder Warmziehen) und der Mechanismus der Abrasion bei hohen Temperaturen gezeigt werden.

Über den Verschleiß bei Raumtemperatur sind schon zahlreiche Untersuchungen durchgeführt worden^{(1)~(4)}. Auch über die Abrasion bei hohen Temperaturen sind mehrere Untersuchungen vorhanden^{(5)~(11)}. Aus dem Zusammenfassen dieser Untersuchungen stellt man fest, daß sich die Ergebnisse je nach dem verwendeten Werkstoff voneinander unterscheiden und sogar sich entgegengesetzte Tendenzen zeigen.

Einige bisherige Untersuchungen zeigten, daß die Abrasion des Stahles mit steigender Temperatur zunimmt^{(5)~(8)}, dagegen die Abrasion des Flußstahles bei 200°C ihren Maximalwert erreicht und dann mit zunehmender Temperatur abnimmt⁽⁷⁾.

Andere Untersuchungen wurden über den Verschleiß von Schneidwerkzeugen an Werkzeug-

maschinen durchgeführt. Die Versuche ergaben, daß die Standzeit des Schneidwerkzeuges, wenn der Werkstoff bei Raumtemperatur geschnitten wird, mit steigender Schnitttemperatur abnimmt⁽¹²⁾. Dagegen nimmt die Standzeit des Schneidwerkzeuges zu, wenn man den zu schneidenden Werkstoff erwärmt d. h. wenn die Temperatur der Werkzeug-Span-Grenzfläche (tool-chip interface temperature) steigt.***

Wie oben erwähnt, gäbe es dieses einen Widerspruch, wenn man den Verschleiß als Funktion der Temperatur betrachtet. Die Aufgabe dieser Untersuchung ist es deshalb, diese Frage zu klären.

Bei der praktischen Warmarbeit ändert sich der Temperaturanstieg des Werkzeuges entsprechend seiner Masse, seiner Wärmeleitfähigkeit und seiner Form, wobei Betriebszeit und angewandtes Abkühlungsverfahren weitere Faktoren sind. Wenn die Temperatur des Werkzeuges von diesen Betriebsbedingungen beeinflusst ist, wie oben erwähnt, kann man, um die Abrasion des Werkzeuges analogisch zu erklären, ein Verfahren anwenden, bei dem beide Proben auf diejenige Temperatur erwärmt werden, die an der Berührungsfläche zwischen dem zu warmverformenden Werkstoff

* Eingegangen am 30. November 1963.

** Chef des Dynamischen Materialprüfung-Laboratoriums, Das Staatliche Metallforschung-Institut (National Research Institute for Metals), Meguro-ku, Tokyo.

*** J.N. Wennberg, Die Diskussion des Schrifttums (12). In dieser Diskussion soll „Tool-chip interface temperature“ auch die Schnitttemperatur bedeuten.

und dem Werkzeug entsteht. Deshalb ist das bereits bekannte Verfahren von Bedeutung, bei dem beide Proben während des Reibungsversuches in einem Ofen auf diese Temperatur erwärmt werden. Bei diesem Versuch kann aber eine Verschweißung der beiden Proben vorkommen, wodurch eine Streuung der Ergebnisse auftreten kann. Bei diesem Verfahren tritt der Verschleiß bei beiden Proben gleichzeitig auf, wodurch die Erscheinung der Abrasion schwieriger zu untersuchen ist. Durch diese Versuche konnten jedoch bereits einige Erscheinungen der Abrasion bei hohen Temperaturen geklärt werden.

Um die Abrasion des Werkzeuges bei Warmarbeit zu untersuchen, ist es zweckmäßig, die stillstehende, nicht erwärmte Probe gegen die sich drehende erwärmte rohrförmige Probe aus zunderfestem Stahl zu drücken und abreiben zu lassen. Durch einen solchen Versuch hat A. A. Bartel u. a.⁽⁹⁾ Schmiermittel für die höchsten Temperaturen untersucht. Bei diesem Versuch läßt sich aber die Abrasion als Funktion der Temperatur nur schwer ermitteln, da die Temperatur der stillstehenden Probe während der Abriebprüfung stetig zunehmen soll, wenn die Masse der stillstehenden Probe kleiner als die der sich drehenden Probe ist. Deshalb muß man dabei die Temperatur der stillstehenden Probe so regulieren, daß diese auf der Betriebstemperatur des Werkzeuges bleibt.

Ein weiteres Problem ist das der Belastung. Wenn man die Belastung bei dieser Abriebprüfung bis zur Warmfestigkeit des zu prüfenden Werkstoffes steigert, wird der Werkstoff verformt. Dabei vergrößert sich die Abrieboberfläche und die Bedingungen der gleichen Belastung je Flächeneinheit können nicht gehalten werden. Wie bereits oben erwähnt, ist es deshalb sehr schwer, durch Laborversuche die Erscheinung der Abrasion des Warmarbeitswerkzeuges wiederzugeben.

In der vorliegenden Untersuchung wurde eine Abriebprüfvorrichtung hergestellt, bei der die erhitze stillstehende Probe gegen die sich drehende Probe gedrückt und abgerieben wird. Hierbei wird die Abrasion des Stahles bei hohen Temperaturen zwar unter anderen Bedingungen als im Betrieb untersucht, aber man kann mit dieser Abriebprüfmaschine einen Anhalt bekommen und dadurch in Zukunft weitere Prüfverfahren über die sehr komplizierte Abrasion von Werkzeugstählen entwickeln.

Die Konstruktion der Abriebprüfmaschine ist derart ausgeführt, daß dabei die stillstehende und bis auf eine Prüftemperatur erhitze Probe gegen die Mantelfläche der sich drehenden Probe durch einen Hebel gedrückt wird. Dieser Hebel war in

unserem Institut hergestellt worden und wurde in einer von Shimazu A. G. hergestellte Verschleißprüfmaschine vom Nishihara-Type eingebaut.

Um den Einfluß des Gefüges der Probe auf die Abrasion der gepaarten Probe zu ermitteln, wurde für die rotierende Probe globularer bzw. lamellarer Perlit gewählt.

2. Herstellung der Abriebprüfmaschine

Bild 1 zeigt den schematischen Aufbau der hergestellten Abriebprüfmaschine. In Bild 1 (a) befindet sich eine stillstehende Probe zwischen zwei Kohlen- oder Silitelektroden. Legt man an diese Elektroden über einen Regelwiderstand eine elektrische Spannung an, so wird die stillstehende Probe erhitzt.

Diese Prüfeinrichtung hatte aber in der Praxis einige Nachteile. Bei Verwendung der Kohlenelektroden wurden die Elektrodenspitzen bei den hohen Temperaturen sehr schnell verbraucht, außerdem war die Temperaturverteilung in der Probe nicht gleichmäßig. Die Silitelektroden dagegen zerbrochen sehr oft wegen des in ihnen auftretenden Warmrisses, außerdem wurden die aus Messing bestehenden Klemmschrauben durch die hohe Temperatur sehr leicht beschädigt.

In Bild 1 (b) ist der Versuchsaufbau unter Verwendung von Kupferelektroden gezeigt. Mit Hilfe von zwei Transformatoren wurde nun die Probe von Strömen bis zu 400 A durchflossen. Die Temperatur der Probe konnte leicht reguliert werden und außerdem wurde die Probe jetzt gleichmäßig erhitzt. Deshalb wurde diese Versuchsanordnung bei dem nun folgenden Prüfverfahren angewandt.

Bild 1. Schematische Darstellung der hergestellten Abriebprüfmaschine

Die Bilder 2 (a) und 2 (b) zeigen den gesamten Versuchsaufbau sowie die erhitzte Probe. In Bild 2 (a) befindet sich rechts die Schalttafel mit den beiden Transformatoren und dem Reglerknopf, durch welchen der elektrische Strom und damit die Temperatur der stillstehenden Probe eingestellt werden konnten. In der Mitte des Bildes 2 (b) ist die erhitzte Probe als kleiner weißer Block zu sehen. An den beiden Seiten der Probe befinden sich die Kupferelektroden, an welche über zahlreiche Kabel die beiden dicken Leitungsschienen aus Kupfer angeschlossen sind. Die anderen nicht mehr im Bild dargestellten Enden dieser Leitungsschienen sind an die Sekundärwicklung des Transformators angeschlossen. Die Probe war also durch die Federkraft der Sekundärwicklung geklemmt. Für die Temperaturmessung wurde ein Thermoelement an der Probe angebracht, dessen Zuleitungen im Bild zwischen den beiden Leitungsschienen zu sehen sind. An der Abriebfläche gab es keinen Kurzschluß. Die Spannung zwischen den beiden Elektroden betrug nur 1,5 V. Es kam deshalb auch keine Funkenbildung vor, wenn man den Belastungshebel, welcher die erhitzte Probe gegen die rotierende Probe drückte, mit der Hand bewegte. An der Abriebfläche der rotierenden Probe wurden auch niemals Spuren gefunden, die durch Funkenbildung entstanden wurden.

3. Versuchsdurchführung

Mit der oben beschriebenen Abriebprüfmaschine

(a) Gesamtansicht

(b) Die erwärmte Probe und die Prüfvorrichtung

Bild 2. Bilder der hergestellten Abriebprüfmaschine

wurden die vorliegenden Versuche ausgeführt. In Bild 3 ist die rotierende Probe dargestellt. Diese ist ringförmig und hat einen Außendurchmesser von 26 mm, einen Innendurchmesser von 16 mm und eine Breite von 4 mm. Als Werkstoff für die rotierende Probe wurde ein Kohlenstoffstahl mit 0,76% C gewählt. Seine chemische Zusammensetzung ist in Tafel 1 aufgegliedert. Um den globularen bzw. lamellaren Perlit entstehen zu lassen, wurde diese Probe zweierlei Wärmebehandlungen unterzogen, die in Tafel 2 wiedergegeben sind.

1G ist die Bezeichnung des Kohlenstoffstahles aus globularem Perlit.

1L ist die Bezeichnung des Kohlenstoffstahles aus lamellarem Perlit.

Tafel 1. Zusammensetzung des Werkstoffes der rotierenden Probe

Bezeichnung	Werkstoff	Zusammensetzung				
		C %	Si %	Mn %	P %	S %
1	Kohlenstoffstahl mit 0,76% C	0,757	0,097	0,23	0,023	0,013

Tafel 2. Wärmebehandlung und Härte des Werkstoffes der rotierenden Probe

Bezeichnung	Gefüge	Wärmebehandlung	Vickershärte
1G	Globularer Perlit	von 780°C abgeschreckt in Wasser, bei 150°C angelassen und noch bei 700°C, 7h angelassen	198
1L	Lamellarer Perlit	bei 850°C, 4h normal geglüht	222

Bild 3. Form und Abmessungen der rotierenden Probe

1G $\times 240$ 1L $\times 240$

Bild 4. Gefüge des Werkstoffes der rotierenden Probe (Ätzung: 5% Nital)

In Bild 4 sind die beiden Gefüge nach der Wärmebehandlung dargestellt. Die Vickershärte der beiden Gefüge ist ebenfalls in Tafel 2 angegeben.

Die Abmessungen der stillstehenden Probe sind in Bild 5 eingetragen. Diese Probe hat die Form eines Quaders. Damit aber die Probe über ihre gesamte Länge auf dem Mantel der rotierenden Probe aufliegt, hat ihre Reibungsfläche eine Krümmung mit dem Radius von 13 mm. An der Seite der Probe ist eine kleine Bohrung, in der das Thermoelement untergebracht wurde.

Für die stillstehende Probe wurden drei Kohlenstoffstähle mit 0,35, 0,8 und 1,0% C verwendet. Zusammensetzung und Wärmebehandlung sind in Tafel 3 wiedergegeben. In Bild 6 sind die einzelnen Gefüge nach der Wärmebehandlung zu sehen. Man erkennt, daß das Gefüge der Probe A das normale Gefüge für Kohlenstoffstahl aus Ferrit und Perlit ist, während das Gefüge der Probe B aus etwas globularem Perlit besteht und das Gefüge der Probe C sich aus lamellarem Perlit und etwas globularem Perlit zusammensetzt.

Nach einem Vorversuch wurden die Bedingungen für die einzelnen Abriebprüfungen bestimmt, die in Tafel 4 zusammengefaßt sind. Im folgenden sollen die einzelnen Arbeitsgänge des Prüfverfahrens wiedergegeben werden: Zuerst wurden die beiden Proben in der Versuchsanlage eingebaut, wie in Bild 1(b) gezeigt, dann wurde der Strom eingeschaltet. Durch langsames Drehen des Regler-

knopfes des Autotransformators wurde die Primärwicklung unter Spannung gesetzt; die stillstehende Probe erwärmte sich. Nach Erreichen der Prüftemperatur wurde der Motorschalter der Abriebprüfmaschine eingeschaltet. Die Zeit bis zum Erreichen der Prüftemperatur betrug weniger als 1 Minute. Sobald der Motor die rotierende Probe antrieb, nahm die Temperatur der stillstehenden Probe um etwa 50°C zu. Durch das Regulieren des Autotransformators mußte dann die Temperatur wieder auf die vorher eingestellte Prüftemperatur gebracht werden. Durch die am Anfang noch auftretenden Temperaturschwankungen wurde für diesen Regulierprozess etwa 1 Minute benötigt. Danach konnte man aber durch nur geringes Regulieren die Prüftemperatur mit

Tafel 4. Versuchsbedingungen für die Abrasion bei den verschiedenen Temperaturen

Artikel	Versuchsbedingungen oder Wert
Abrasionsart	ohne Schmiermittel
Belastung	5,2 kg
Belastung in cm ²	11,5 kg/cm ²
Drehzahl	850 U/min
Gleitgeschwindigkeit	1,16 m/s
Laufweg	420 m
Atmosphäre	in Luft
Temperatur der stillstehenden Proben	Raumtemperatur, 500°C und 700°C

Tafel 3. Zusammensetzung, Wärmebehandlung und Härte der Werkstoffe der stillstehenden Proben

Bezeichnung	Werkstoff	Zusammensetzung					Wärmebehandlung	Vickershärte
		C %	Si %	Mn %	P %	S %		
A	Kohlenstoffstahl mit 0,35% C	0,352	0,103	0,56	0,017	0,021	bei 700°C, 2h erwärmt, und im Ofen abgekühlt.	154
B	Kohlenstoffstahl mit 0,8% C	0,80	0,093	0,33	0,010	0,007		183
C	Kohlenstoffstahl mit 1,0% C	1,00	0,099	0,33	0,011	0,019		177

Bild 5. Form und Abmessungen der stillstehenden Probe

Bild 6. Gefüge der Werkstoffe der stillstehenden Proben (Ätzung: 5% Nital)

einer Genauigkeit von $\pm 10^\circ\text{C}$ einhalten.

Um auch die Temperatur der rotierenden Probe messen zu können wurde nach jedem Versuch das Thermoelement auf den Mantel der rotierenden Probe gelegt. Die Abrasion wurde aus dem Gewicht der Probe vor und nach dem Versuche errechnet. Vor jeder Gewichtsbestimmung auf einer Analysenwaage wurde die Probe mit Benzin gesäubert.

Die Form des Abriebstaubes, der bei den verschiedenen Versuchen von der stillstehenden Probe A bzw. B gewonnen wurde, wurde mit dem Elektronenmikroskop untersucht. Außerdem wurden die Bestandteile des Abriebstaubes durch Röntgenbeugungsaufnahmen festgestellt. Schließlich wurden noch das Profil und der Zustand der Abrieboberfläche untersucht.

4. Versuchsergebnisse

4.1 Ergebnisse der Abriebuntersuchung

Die Bilder 7, 8 und 9 zeigen die Ergebnisse der Abriebuntersuchungen, die an den in Tafel 3 beschriebenen Proben A, B und C bei verschiedenen Temperaturen vorgenommen wurden. In Bild 7 sind die Werte der Abriebuntersuchungen der

Bild 7. Versuchsergebnisse bei den verschiedenen Temperaturen der stillstehenden Probe A

Probe A bei Raumtemperatur, bei 500°C und bei 700°C eingetragen und diese Werte bei dem Laufweg von 420 m gewonnen wurden. Die Versuche wurden auf den rotierenden Proben vom Typ 1 G und 1 L vorgenommen. In den Bildern 8 und 9 sind die Versuchsergebnisse eingetragen, die unter gleichen Bedingungen mit dem stillstehenden Proben B und C gewonnen wurden.

Aus diesen graphischen Darstellungen kann man erkennen, daß bei den Abriebversuchen bei Raumtemperatur die Temperatur der stillstehenden Probe mitunter auf etwa 100°C ansteigt. Die Temperaturen der durch Reibungswärme und Wärmeleitung ebenfalls erwärmten rotierenden Probe sind in Klammer neben jeden Messpunkt

Bild 8. Versuchsergebnisse bei den verschiedenen Temperaturen der stillstehenden Probe B

Bild 9. Versuchsergebnisse bei den verschiedenen Temperaturen der stillstehenden Probe C

eingetragen.

Die Ergebnisse zeigen, daß die Abrasion an der stillstehenden Probe bei Raumtemperatur und bei 500°C etwa gleich ist. Bei einer Prüftemperatur von 700°C dagegen nimmt die Abrasion der stillstehenden Probe erheblich zu. Die Abrasion der rotierenden Probe ist dagegen beim Versuch bei Raumtemperatur am größten. Wird die stillstehende Probe auf 500°C und 700°C erwärmt, wird die rotierende Probe nicht mehr abgerieben. Vielmehr nahm das Gewicht der rotierenden Probe ein wenig zu, da der Abriebstaub der stillstehenden Probe auf dem Mantel der rotierenden Probe aufgeschweißt wurde. Die Abrasion der sich drehenden Probe wurde deshalb in den graphischen Darstellungen bei den hohen Prüftemperaturen im negativen Bereich eingezeichnet.

Als nächstes soll der Einfluß des Gefüges der rotierenden Probe auf ihre eigene Abrasion und auf die Abrasion der stillstehenden Probe betrachtet werden. Bei der Prüftemperatur von 700°C war die Abrasion der stillstehenden Probe am größten. Jedoch war die Abrasion der stillstehenden Probe auf der Probe 1L größer als auf der Probe 1G. Bei den Versuchen bei Raumtemperatur wurde die rotierende Probe 1G mehr als die rotierende Probe 1L abgenutzt. Beide Proben 1G und 1L wurden dagegen mit steigender Prüftemperatur, unabhängig von ihrem Gefüge, nicht mehr abgenutzt, sondern nahmen, wie schon erwähnt, an Gewicht ein wenig zu.

Bei den oben erwähnten Versuchen wurde die

Bild 10. Gewichtveränderung der stillstehenden Proben (A, B und C) durch die Oxydation bei 500°C und 700°C (Erwärmungsdauer 6 min in Luft)

Bild 11. Die Form des bei den verschiedenen Temperaturen gebildeten Abriebstaubes, wenn Probe A mit Probe 1G untersucht wurde

Gewichtsveränderung, die durch Oxydation der Seitenflächen der stillstehende Probe entstand, nicht berücksichtigt. In einem Parallelversuch wurde die stillstehende Probe 6 Minuten lang—das entsprach der Versuchsdauer—bei 500°C bzw. 700°C geglüht, um die durch Oxydation entstehende Gewichtsveränderung festzustellen. Das Versuchsergebnis ist in Bild 10 dargestellt. Man erkennt, daß die Proben, wenn der Zunder nicht abgeblättert wurde, etwas an Gewicht zunahmten. Diese Werte sind aber so klein, daß sie vernachlässigt werden.

4.2 Untersuchung des Abriebstaubes mit dem Elektronenmikroskop

Dabei sollte untersucht werden, ob sich die Form des Abriebstaubes, der bei den Versuchen bei verschiedenen Prüftemperaturen entsteht, ändert. Bild 11 zeigt die Formen des Abriebstaubes, die bei den verschiedenen Prüftemperaturen erzeugt wurden, als die Probe A auf der Probe 1G geprüft wurde. Bild 12 zeigt die Form des Abriebstaubes, der entstand, als die Probe B bei 700°C auf der Probe 1G untersucht wurde. Betrachtet man diese Abbildungen, so könnte man vermuten, daß der Abriebstaub zum Teil kugelförmig geworden wäre, wenn er während der Abriebprüfung geschmolzen wäre. Aber eine solche Erscheinung wurde nicht beobachtet. Wie Bild 11 und 12 außerdem zeigen, ist der Unterschied zwischen den Formen des Abriebstaubes, der bei hohen Temperaturen und bei Raumtemperatur entstand, nicht groß.

4.3 Profil der Abrieblfläche und Zustand der Abriebgrenzschicht

Das Profil wurde mit einer Projektionseinrichtung nach Lichtschnittverfahren, senkrecht zur Richtung des Abriebes, gemessen. Die Bilder 13 (a) und (b) zeigen das Profil der Abrieblfläche der Probe A, die bei verschiedenen Prüftemperaturen auf den Proben 1G und 1L untersucht wurde. In den Bildern 14 (a) und (b) ist das Profil der

Bild 12. Die Form des bei der Prüftemperatur von 700°C gebildeten Abriebsstaubes, wenn Probe B mit Probe 1G untersucht wurde

Abrieblfläche der Probe B, die ebenfalls bei verschiedenen Prüftemperaturen auf den rotierenden Proben 1G und 1L untersucht wurde, dargestellt. Das Profil wurde dabei zwar mit einem etwas makroskopischen Verfahren gemessen, doch erkennt man, daß kein großer Unterschied zwischen den einzelnen Rauheiten besteht. In den Abbildungen ist die Abszissenachse gleichzeitig die jungfräuliche Oberfläche der Probe vor dem Versuch. Damit zeigt die Ordinate die Tiefe der Abrieblfläche nach dem Versuch. Die Tiefe der Abrieblfläche muß im Verhältnis zur Abrasion stehen. Daher bestätigen die Untersuchungen der Tiefe der Abrieblfläche auch die Ergebnisse, die in den Bildern 7 und 8 zu sehen sind.

Als nächstes wurde der oxydierte Zustand an der Abriebgrenzschicht mit dem Mikroskop untersucht. Die Bilder 15 bis 18 zeigen die Schiffe der Proben A und B nach den Versuchen bei verschiedenen Temperaturen. Die Schiffe wurden senkrecht zur Abriebrichtung angefertigt. Die Proben A und

B, deren Schiffe in den Bildern 15 und 17 zu sehen sind, wurden jeweils auf der rotierenden Probe 1G untersucht. In den Bildern 16 und 18 sind die Schiffe der Proben A und B gezeigt, die auf der rotierenden Probe 1L untersucht wurden.

Aus den Bildern kann man deutlich erkennen, daß sich bei den Versuchen bei Raumtemperatur in den Randzonen Oxydeinschlüsse befinden, die während des Versuchs in die oberste Schicht eingewalzt wurden. Auch bei einer Prüftemperatur von 500°C blieb eine dicke Oxydschicht auf der Abrieboberfläche. Außerdem schien die Abrieblfläche rauher zu werden. Dagegen wurde die Oxydhaut bei einer Prüftemperatur von 700°C mit Ausnahme von Bild 17 dünner. Auch die Abrieblfläche wurde etwas glatter.

4.4 Analyse des Abriebstaubes durch das Röntgenbeugungsverfahren

In der Tafel 5 sind die Bestandteile des Abriebstaubes, der bei den Versuchen bei verschiedenen Prüftemperaturen entstand, eingetragen.

Bild 13. Profil und Tiefe der Abrieboberflächen der Probe A nach der Prüfung bei verschiedenen Temperaturen

Bild 14. Profil und Tiefe der Abrieboberflächen der Probe B nach der Prüfung bei verschiedenen Temperaturen

Tafel 5. Bestandteile des Abriebstaubes, die durch das Röntgenbeugungsverfahren analysiert wurden.

Prüftemperatur	Probepaar	Bestandteile des Abriebstaubes	Probepaar	Bestandteile des Abriebstaubes
Raumtemp.	1G : A	αFe	1L : A	αFe
500°C	1G : A*	$\alpha\text{Fe} + \text{Fe}_3\text{O}_4$	1L : A	$\alpha\text{Fe} + \alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$
700°C	1G : A	$\alpha\text{Fe} + \text{Fe}_3\text{O}_4 + \alpha\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$	1L : A	$\alpha\text{Fe} + \text{Fe}_3\text{O}_4 + \alpha\text{Fe}_2\text{O}_3 + (\text{FeO})$
Raumtemp.	1G : B	—	1L : B	αFe
500°C	1G : B	$\alpha\text{Fe} + \text{Fe}_3\text{O}_4 + \alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$	1L : B	$\alpha\text{Fe} + \alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$
700°C	1G : B	$\alpha\text{Fe} + \text{Fe}_3\text{O}_4 + \alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$	1L : B	$\alpha\text{Fe} + \text{Fe}_3\text{O}_4 + \alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$

* : Man erkannte die rote Farbe auf dem Patronepapier, in dem der Abriebstaub eingewickelt und erhalten wurde.
 () : Der Debye-Scherrer-Ring wurde so weich aufgenommen, daß man nur schwer analysieren konnte.
 Der Debye-Scherrer-Ring für den am Ende getrennten Bestandteil wurde etwas weich aufgenommen.

Bild 15. Abriebgrenzschicht der Probe A nach der Prüfung, wenn diese bei verschiedenen Temperaturen mit der Probe 1G untersucht wurde

Bild 17. Abriebgrenzschicht der Probe B nach der Prüfung, wenn diese bei verschiedenen Temperaturen mit der Probe 1G untersucht wurde

Bild 16. Abriebgrenzschicht der Probe A nach der Prüfung, wenn diese bei verschiedenen Temperaturen mit der Probe 1L untersucht wurde

Bild 18. Abriebgrenzschicht der Probe B nach der Prüfung, wenn diese bei verschiedenen Temperaturen mit der Probe 1L untersucht wurde

Dabei waren die Proben A und B jeweils mit den rotierenden Proben 1G und 1L untersucht worden. Die Bestandteile wurden wie folgt analysiert: Der Abriebstaub, der bei den Versuchen bei Raumtemperatur entstand, bestand nur aus αFe . Dagegen bestand der Abriebstaub bei 500°C zum großen Teil aus αFe und $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$. Der Abriebstaub der Proben A und B, die bei derselben Temperatur mit der rotierenden Probe 1G untersucht wurden, enthielt noch zusätzlich Fe_3O_4 . Bei der Prüftemperatur von 700°C wurde Abriebstaub aus αFe , $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ und Fe_3O_4 erzeugt. Der Abriebstaub der Probe A, die mit den Proben 1G und 1L untersucht wurde, enthielt außerdem noch etwas FeO .

* * *

Dem Direktor von „National Research Institute for Metals“, Herrn Prof. Dr. U. Hashimoto, danke ich für die Anregung und Förderung, und weiter dafür, daß er dem Verfasser die Möglichkeit für die selbständige Durchführung dieser Arbeit in seinem Institut gegeben hat. Herrn Dr. K. Ogawa in „Tokyo Metropolitan Industrial Research Institute“ danke ich für zahlreiche anregende Diskussionen. Ferner habe ich Herrn Dr. K. Endo, „Senior Scientific Research Official in the National Research Institute for Metals“, und Herrn Dr. T. Yanagihara, „Head of Material Testing Division in the National Research Institute for Metals“, für die Anregung und Förderung dieser Arbeit zu danken. Herrn L. Quitt bei Kienzle Apparate GmbH in Villingen danke ich für seine freundliche Hilfe bei der Übersetzung ins Deutsche.

5. Zusammenfassung

Mit einer speziell hergestellten Abriebprüfmaschine wurde die Abrasion von verschiedenen Kohlenstoffstählen untersucht. Bei diesen Versuchen wurde die stillstehende Stahlprobe zunächst bei Raumtemperatur und dann bei den Prüftemperaturen von 500°C und 700°C gegen eine rotierende Stahlprobe gedrückt. Die rotierende Probe bestand ebenfalls aus Kohlenstoffstahl mit 0,76% C und hatte ein Gefüge von globularem bzw. lamellarem Perlit. Die Versuche zeigten, daß die Abrasion der stillstehenden Probe bei Raumtemperatur und bei 500°C ziemlich gleich ist. Wurde dagegen die Probe bis auf 700°C erhitzt, so nahm die Abrasion sehr zu.

Die Abrasion der rotierenden Probe war wiederum bei den Versuchen bei Raumtemperatur am größten. Nachdem aber die stillstehende Probe auf 500°C bzw. 700°C erhitzt worden war, fand an der rotierenden Probe keine Abrasion mehr statt; vielmehr konnte eine geringe Gewichtszunahme festgestellt werden, die durch Aufschweißung des

Abriebstaubes der stillstehenden Probe zustande kam.

Der bei den verschiedenen Prüftemperaturen entstandene Abriebstaub wurde mit dem Elektronenmikroskop untersucht. Dabei konnten keine wesentlichen Formunterschiede festgestellt werden.

Bei der Betrachtung der einzelnen Schliffe wurde beobachtet, daß bei den Versuchen, die bei Raumtemperatur vorgenommen wurden, Oxydeinschlüsse in die Randzonen der Probe eingewalzt wurden. Auch bei den Versuchen, die bei 500°C gemacht wurden, konnte eine dicke Oxydschicht an der Abrieboberfläche bemerkt werden, die Oberfläche war außerdem etwas rauher geworden. Bei den Versuchen, die bei einer Prüftemperatur von 700°C durchgeführt wurden, entstand nur ein dünner Oxydbelag und die Oberfläche war glatter als bei den vorhergehenden Versuchen.

Mit dem Röntgenbeugungsverfahren wurde festgestellt, daß die Bestandteile des Abriebstaubes, der bei den Raumtemperaturversuchen erzeugt wurde, aus αFe bestanden. Der Abriebstaub, der bei 500°C entstand, setzte sich aus $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ und αFe zusammen, gegebenenfalls wurde noch etwas Fe_3O_4 gefunden. Die Versuche bei 700°C ergaben einen Abriebstaub mit den Bestandteilen $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$, αFe und Fe_3O_4 .

Mit den bei der vorliegenden Untersuchung erzielten Ergebnissen über Form und Zusammensetzung des Abriebstaubes, Rauheit und Zustand der Abrieboberfläche, ist es noch nicht möglich, das Auftreten der Abrasion bei hohen Temperaturen zu erläutern. In der zweiten Mitteilung soll darüber weiter berichtet werden.

Schrifttum

- (1) K. Honda u.a.: *Kinzoku no Kenkyu*, Vol. 1 (1924), p. 38 (Veröff. in japanischer Sprache).
- (2) K. Asakura u.a.: *Trans. Japan Soc. Mech. Engrs.*, Vol. 5, No. 21 (1939), p. I-75; Vol. 6, No. 25 (1940), p. I-1; Vol. 7, No. 29 (1941), p. I-26; Vol. 9, No. 35 (1943), p. I-65; Vol. 10, No. 40 (1944), p. I-133; Vol. 11, No. 41 (1945), p. I-59 (Veröff. in japanischer Sprache).
- (3) F.P. Bowden and D. Tabor: *The Friction and Lubrication of Solids*, (1958), p. 285, Oxford.
- (4) R. Mailänder u. K. Dies: *Arch. Eisenhüttenwes.*, Jg. 16, Ht. 10 (1943), S. 385.
- (5) S. Kusunose u. I. Iidaka: *Gokingsaku-Shinron (Neue Legierungskunde)*, (1953), p. 239, Iwanami (Veröff. in japanischer Sprache).
- (6) E. Miyoshi: *Jour. Japan Inst. Metals*, Vol. 22, No. 4 (1958), p.187 and 192 (Veröff. in japanischer Sprache).
- (7) S. Ito: *Report of the Government Mechanical Laboratory*, No.41 (Febr. 1961), p. 60 (Veröff. in japanischer Sprache).
- (8) R.L. Johnson u.a.: *Corrosion*, Vol.16, No.8 (1960), p. 395.
- (9) A.A. Bartel u.a.: *Stahl u. Eisen*, Jg. 81, Nr. 18 (1961), S. 1183.

- (10) R.E. Lee, Jr.: *Matr. Design Engng.*, Vol. 55, No. 3 (1962) p. 109.
(11) T. Nemoto u. T. Tamamura: *Der Vordruck der Vorträge bei 7. Zairyoshiken-Rengo-Koenkai* (7th

- Japan Congress on Testing Materials*), Teil I (1963), S. 57 (Veröff. in japanischer Sprache).
(12) H. Takeyama and R. Murata: *Trans. ASME*, Ser. B, Vol. 85, No. 1 (1963), p. 33.

Diskussion

Frage von T. FUJIWARA: (1) Die in der vorliegenden Untersuchung der Abrasion bei Warmarbeitswerkzeugen gewonnenen Ergebnisse stehen in gewisser Hinsicht im Widerspruch zu den im praktischen Betrieb durchgeführten Beobachtungen. Denn in der Praxis wird der zu verformende erwärmte Werkstoff an einer bestimmten Fläche des feststehenden Werkzeuges vorbeibewegt. Bei der beschriebenen Abriebprüfung sind dagegen Relativbewegungen und Temperaturverhältnisse der Proben gerade umgekehrt.

(2) Es wäre bei der Untersuchung der Abriebfläche zweckmäßiger, den Zustand der rotierenden Probe, die dem Werkzeug bei Warmarbeit entspricht, zu prüfen, denn es soll doch nicht die Abrasion des zu verformenden erwärmten Werkstoffes, sondern die Abrasion des Werkzeuges, das bei der Warmverformung eine wesentlich niedrigere Temperatur hat, untersucht werden.

(3) Die Untersuchung ist jedoch richtig, sofern sie nur als Sonderfall der Abrasion bei hohen Temperaturen betrachtet wird.

Antwort des Verfassers: (1) Im Bezug auf die ursprüngliche Aufgabe dieser Untersuchung sind die oben vorgebrachten Meinungen berechtigt. Durch die Ergebnisse dieser Arbeit wurde jedoch gezeigt, daß die rotierende, nicht erwärmte Stahlprobe wenig abgenutzt wurde, wenn diese mit der stillstehenden erwärmten Probe zusammen in einem Reibungsversuch untersucht wurde. Dadurch wird demonstriert, daß die Warmverformung oder die Warmarbeit in der Praxis einwandfrei zu verwenden ist, und gleichzeitig, daß der auf einer niedrigeren Temperatur gehaltene vergütete Arbeitsstahl von dem zu verformenden erwärmten Stahl wenig abgenutzt wird. Aber mit der Feststellung, daß der durch Erwärmung weich gewordene Stahl mehr und der auf einer niedrigeren Temperatur gehaltene Stahl weniger verschleißt, wenn beide Stähle miteinander einem Reibungsversuch unterworfen werden, ist erst wenig gesagt.

Um den ursprünglichen Zweck dieser Untersuchung zu erreichen, wurde es deshalb für angebracht gehalten, einen Umweg zu machen, und zwar zunächst die Erscheinung der Abrasion zwischen der erwärmten und der nicht erwärmten Probe zu beobachten. Dadurch sollte das Auftreten der Abrasion bei hohen Temperaturen klar ge-

macht werden.

Als nächstes möchte der Verfasser untersuchen, welches das beste Verfahren ist, um die Abriebbeständigkeit von Warmarbeitsstählen zu ermitteln.

(2) Um die erwähnte Erscheinung der Abrasion zu erfassen, schien es besser und einfacher, zunächst den erwärmten, weich gewordenen Stahl zu untersuchen. Deshalb wurde von dem Verfasser in der vorliegenden Untersuchung dieses Verfahren angewandt.

(3) Der Titel dieser Untersuchung besagt, daß ein erwärmter Stahl durch einen nicht erwärmten Stahl einen Abrieb erfährt, wie es bei der Warmverformung ebenfalls der Fall ist.

Frage von T. FUJIWARA: In der Industrie wird z. B. eine Ziehscheibe bei Warmverformungsarbeit abgenutzt, auch wenn sie auf einer niedrigen Temperatur gehalten wird. Bei den Ergebnissen des vorliegenden Versuches wird dagegen der nicht erwärmte Stahl kaum abgenutzt, vielmehr nimmt dieser sogar an Gewicht zu, wenn er zusammen mit einer über 500°C erwärmten Probe in einem Reibungsversuch untersucht wird. Bei dem Versuch wurde eine stillstehende erwärmte Probe mit einer rotierenden kälteren Probe auf ihren Verschleiß hin beobachtet. In der Praxis ist die Arbeitsbedingung aber gerade umgekehrt, denn hierbei wird mit einem stillstehenden kälteren Werkzeug ein sich bewegendes erwärmtes Stahl bearbeitet. Der Verfasser wird deshalb gebeten, sich darüber näher zu äußern.

Antwort des Verfassers: Die in der obigen Diskussion genannten Beobachtungen sind richtig. Die Erscheinung, daß der nicht erwärmte Stahl in dieser Untersuchung nur wenig abgenutzt wurde, ist vielleicht dadurch begründet, daß der Stahl in der kurzen Prüfzeit auf einer wesentlich niedrigeren Temperatur gehalten wurde. Im praktischen Betrieb können viele Ursachen zur Abrasion des Warmarbeitswerkzeuges führen. Aber eine Ursache darunter ist der Temperaturanstieg des Werkzeuges selbst. Hinsichtlich dieser Tatsache stimmt das Ergebnis nicht mit den Ergebnissen im praktischen Betrieb überein. Andererseits kann man erwarten, daß die Standzeit des Warmarbeitswerkzeuges länger wird, wenn bestimmte Bedingungen erfüllt werden, z. B. wenn kein

Temperaturanstieg des Werkzeuges erfolgt oder der Werkzeugstahl auch bei den höchsten Temperaturen seine Abriebbeständigkeit nicht verliert (in diesem Fall sieht man von der Standzeit in Bezug auf den Warmriß ab). Deshalb soll zunächst der Mechanismus der Abrasion von Stahl bei hoher Temperatur genau untersucht werden.

Frage von E. MIYOSHI: Bei der am Anfang der vorliegenden Untersuchung beschriebenen Warmbearbeitung handelt es sich nicht um die Abrasion des zu warmbearbeitenden Werkstoffes, sondern um die Abrasion des Werkzeuges, die eine praktische Bedeutung hat. In der Praxis bestimmt der Riß oder die Zerstörung des Werkzeuges seine Standzeit. Wenn aber die Standzeit des Werkzeuges von seiner Abrasion abhängig ist, sind diese Betriebsbedingungen am besten. Aus der oben erwähnten Tatsache soll nicht die Untersuchung der Abrasion abgelehnt werden, sondern es soll nur gesagt werden, daß die Untersuchung der Abrasion bei hoher Temperatur in einer Richtung fortgesetzt werden soll. Die Untersuchung soll— anders als bei dem Raumtemperaturversuch— darauf hinzielen, daß der Zusammenhang zwischen der Veränderung des Oberflächenzustandes und den Abriebbedingungen geklärt wird.

Sowohl der Verschleiß als auch die Abrasion sind Erscheinungen, bei welchen die kleinsten Metallteilchen von der Metalloberfläche auf irgend eine Weise entfernt werden. Bei dem einen handelt es sich um einen Mechanismus, bei welchem kleine metallische Teilchen von der Metalloberfläche losgelöst werden, bei dem andern um einen Vorgang, bei welchem metallische Teilchen aus der Metalloberfläche herausgerissen werden. Man spricht nicht von Verschleiß, wenn der Verschleißstaub von der Metalloberfläche entfernt und an anderer Stelle der selben Oberfläche wieder aufgeschweißt wird. Die Werkstoffeigenschaften sind von ersterem abhängig, während die Geometrie der Abriebfläche, die Art der gegenseitigen Berührung, die Schwingungen der Abriekörper und die Atmosphäre mit letzterem in Zusammenhang gebracht werden können. Für den praktischen Betrieb wäre es daher nützlich, daß letzteres verbessert würde.

Die Untersuchung bei hohen Temperaturen sollte aus zwei Gründen erfolgen. Zum ersten sollte der Einfluß der Oxydation untersucht werden, zum anderen ist der Einfluß des Oxydes selbst auf die Werkstoffeigenschaften von Interesse. Wenn die Oberfläche von einer Oxydschicht überzogen wird, nimmt die Verschleißbeständigkeit in einigen Fällen zu, in anderen Fällen ist dagegen ein Abnehmen dieser Verschleißbeständigkeit zu

verzeichnen.

Wenn sich die Oxydschicht abkühlt, härtet sie sich aus. Danach erfährt der Oxydstaub die Wirkung der mechanischen Abrasion bzw. wenn der Oxydstaub auf der Metalloberfläche gut verschweißt, höhlt er Teilchen aus der erwärmten weichen Oberfläche aus.

Es kann nicht ohne Bedeutung sein, daß das Ergebnis Gewichtsänderung der Probe zeigt. Aber die Werte dieser Gewichtsänderung streuen sich und sind dadurch unsicher. Daher ist es schwierig, daraus eine Folgerung zu ziehen. Die Analyse des Abriebstaubes dient auch wenig dazu, die Untersuchung der Abrasion bei hohen Temperaturen zu klären.

Wie bereits oben erwähnt, ist es schwierig, sowohl den Mechanismus als auch die Erscheinung der Abrasion aus Abriebprüfungen bei hohen Temperaturen zu erfassen. Deshalb wünsche ich, daß der Verfasser aus einer Vielzahl von Ergebnissen zu einer eindeutigen Klärung kommt.

Antwort des Verfassers: (1) Der Verfasser dankt für diese wertvolle Diskussion, die bestimmt bei weiteren Untersuchungen von Nutzen sein wird.

(2) Wie der Diskutierende bereits erwähnt hat, ist die Erscheinung des Verschleißes oder der Abrasion sehr kompliziert. Aber viele Verschleißerscheinungen sind bereits durch mehrere inhaltvolle Untersuchungen bei Raumtemperatur geklärt worden. Deshalb scheint es angebracht zu sein, das Auftreten der Abrasion bei hohen Temperaturen mit der Verschleißerscheinung bei Raumtemperatur vergleichend zu untersuchen.

Frage von H. SHIMODA: (1) In den Bildern 7 bis 9 ist die Temperatur der stillstehenden Probe als Abszisse angegeben. Wenn statt dessen die Abrasion, die bei gleichen Prüftemperaturen von der Härte der Probe abhängig ist, als Ordinate gewählt würde, könnte der Unterschied der Ergebnisse, die bei den Versuchen mit Probe 1G und 1L erzielt wurden, besser gezeigt werden.

(2) Durch diese Untersuchung soll die Erscheinung der Abrasion von Stahl bei Warmverformung geklärt werden. Es ist aber sehr schwierig, diese Versuchsbedingungen im Laboratorium wiederzugeben, und folgende Aufgaben wurden in der vorliegenden Untersuchung noch nicht geklärt:

(i) Was für ein Modell kann den in einer kurzen Zeit auftretenden Übergangsvorgang der Abrasion nachbilden, und wie können die zahlreichen Wiederholungen der in der vorliegenden Untersuchung erzielten Erscheinung erfaßt werden?

(ii) Wie wird der Einfluß der Abmessung

bei der Erscheinung, die den Wärmeleitungsvorgang begleitet, erfaßt? (Vergleich der Ergebnisse vom Betriebswerkzeug mit den Ergebnissen der Probe).

(iii) Bei praktischer Warmbearbeitung beträgt der Berührungsdruck zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück einige kg/mm^2 und mehr, dagegen beträgt die Belastung in der vorliegenden Untersuchung nur $0,11 \text{ kg/mm}^2$.

Wie oben bereits erwähnt, scheinen viele Fragen in der vorliegenden Untersuchung ungeklärt geblieben zu sein. Es wird deshalb empfohlen, diese Fragen noch weiter zu untersuchen.

Antwort des Verfassers: (1) Die Härte der Probe bei den einzelnen Prüftemperaturen ist von großer Wichtigkeit. Bei der vorliegenden Untersuchung wurde die Härte des Probenwerkstoffes bei den einzelnen Prüftemperaturen mit einer älteren Härteprüfmaschine gemessen. Seit kurzem steht aber eine neue Härteprüfmaschine zur Verfügung. Die mit der alten Prüfmaschine erzielten Ergebnisse wurden deshalb nicht berücksichtigt. Die mit der neuen Prüfmaschine gemessenen Ergebnisse werden dagegen im nächsten Teil dieser Untersuchung veröffentlicht werden.

(2) In der Beantwortung der von Herrn Dr. T. Fujiwara gestellten Frage wurde bereits erwähnt, daß zunächst die Erscheinung der Abrasion, die zwischen dem Werkzeug und dem warmverformten Werkstoff auftritt, untersucht werden soll. Erst danach soll die Abrasion des Werkzeuges erklärt werden. Die Klärung der Aufgaben, auf die hingewiesen wurde, ist sehr wichtig. Es wird schwierig sein, diese Probleme zu lösen, gegebenenfalls müssen Versuche im praktischen Betrieb durchgeführt werden. Der Verfasser wird daher diese Aufgaben noch weiter untersuchen.

Frage von K. OGAWA: Die vorliegende Untersuchung kann eigenartig, aber auch sehr aufschlußreich sein. Ich möchte deshalb einige Fragen über den Versuch stellen.

(1) Wenn man die Erscheinung des üblichen Verschleißes mikroskopisch untersucht, so sieht man, daß der Verschleiß durch Abrupfen oder Fressen auf der Abrieboberfläche entsteht. In der vorliegenden Untersuchung erfolgten die Beobachtung unter der Bedingung, daß die Stahlproben eine Temperatur von 500°C bzw. 700°C hatten. Dabei kann die Abriebfläche bereits im schmelzenden Zustand sein. Schon beim üblichen Verschleiß kann ein schmelzender Zustand auftreten. Dieser schmelzende Zustand wird in Japan "Yoyu-

mamo" genannt und für den Schmelzverschleiß gehalten. Der Diskutierende vermutet daher, daß die Erscheinung in der vorliegenden Untersuchung ebenfalls Schmelzverschleiß ist. Deshalb tritt auch bei der gemessenen Abrasion eine große Streuung der Ergebnisse auf. Aus diesem Grunde wird es auch sehr schwierig sein, diese Erscheinung zu rekonstruieren.

(2) Wenn die Probe auf 700°C erwärmt wird, erreicht man bereits die Nähe der Umwandlungstemperatur von Ar_1 . Dieses hat jedoch mehr für die Warmverformung als für die Abrasion Bedeutung. Ist es daher überhaupt notwendig, daß der Einfluß des Werkstoffgefüges bzw. des Kohlenstoffgehaltes auf die Abrasion erwähnt wird, da nur mit Kohlenstoffstählen Versuche gemacht wurden? In allen Fällen zeigten die Versuchsergebnisse große Streuung und es wird daher schwierig sein, die Versuche zu rekonstruieren.

(3) Wenn der Verfasser seinen Versuchen noch eine Untersuchung von hitzebeständigen Stählen hinzufügen und die gewonnenen Ergebnisse mit den Ergebnissen bei Kohlenstoffstählen vergleichen würde, wäre die vorliegende Untersuchung noch mehr verständlich.

Antwort des Verfassers: (1) Auch in meiner Untersuchung war eine gleiche Streuung der Gewichtswerte zu bemerken, wie auch durch den Schmelzverschleiß bei Raumtemperatur eine Streuung auftritt. Diese Erscheinung wurde in dem vorliegenden Bericht noch nicht behandelt. Wenn die Abriebfläche des Stahles zu schmelzen beginnt, kann die Möglichkeit einer Verschweißung zwischen der rotierenden und der stillstehenden Probe groß sein. Wenn die Verschweißung bei der stattfindenden Abrasion stark auftritt, werden die Ergebnisse des Abrasionsversuches stark streuen. Diese Beobachtung wird im nächsten Bericht wiedergegeben.

(2) Die Abrasion der Stähle war bei den Versuchen bei hohen Temperaturen von den verschiedenen Kohlenstoffgehalten fast unabhängig. Dieses wurde auch von dem Diskutierenden bereits erwähnt und soll ebenfalls im zweiten Bericht betrachtet werden.

(3) In der Reihe der Versuche wurden auch Abriebprüfungen mit Proben aus 13-Cr nichtrostendem Stahl bzw. mit hitzebeständigen Legierungen gemacht. Die Ergebnisse dieser Versuche werden im dritten Teil dieses Berichtes wiedergegeben werden.