

F. van der Sluis, A. Brandsma, J. van Lith, K. van der Meer, A. van der Velde, B. Pennings

Spannungsreduzierung in Schubgliederbändern für stufenlose Automatikgetriebe

Stress Reduction in CVT Push Belt Rings

Seit Produktionsbeginn stufenloser Schubgliederbandgetriebe haben Kundenspezifikationen bezüglich Leistungsübertragung, Drehmoment, Spreizung, Einbauraum und Lebensdauer stetig zugenommen. Daher ist es für Van Doorne's Transmissie (VDT) eine kontinuierliche Aufgabe, die Leistungsdichte seiner Schubgliederbänder zu erhöhen. Dieser Beitrag diskutiert Maßnahmen in der eigenen Ringfertigung, um dieses Ziel zu erreichen.

Abstract Since the push belt Continuously Variable Transmission (CVT) first came into production, customer specifications on transmittable power, torque, space envelope, ratio coverage and durability have been extended. In answer to these changing demands, Van Doorne's Transmissie (VDT) dedicates itself to a continuous effort to improve the power density of its push belt. This paper discusses production measures that contribute to reaching this goal.



Das Schubgliederband im CVT

1 Einleitung

Die Leistungsdichte eines Bandes wird hauptsächlich von der Ermüdungsgrenze des Ringmaterials bestimmt. Neben reinen Zugspannungen spielen auch Biegespannungen eine wichtige Rolle. Diese resultieren aus den Laufradien des Bandes in den Kegelscheibenpaaren. Die Biegespannungen sind am größten in den Fahrsituationen Overdrive (OD) und Underdrive (UD); sie können maximal 40 % der

gesamten Belastung betragen. Das Reduzieren kritischer Spannungen in den Ringen des Bandes erhöht die Leistungsdichte. Innerhalb heutiger Konstruktionen ist dies mit verbessertem Vorbiegen der Ringe zu schaffen.

Die Ringe werden in der Produktion vorgebogen. Dieser Prozess bringt Restspannungen in den Werkstoff ein. Diese helfen, die Biegespannungen während des Variatorbetriebs zu verringern.

Dieser Beitrag behandelt ein theoretisches Modell, das die spannungskritischen Regionen beschreibt und die Wirkung von Maßnahmen beim Vorbiegen voraussagt. Die Theorie wurde mit Dauerversuchen geprüft. Eine neue Bandkonstruktion wurde mittlerweile eingeführt.

2 Einbringen von Restspannungen beim Vorbiegen

Die hier betrachteten Restspannungen werden während des Vorbiegens eingebracht. Während dieses Prozesses werden die Ringe, in denen alle vorhergehenden Restspannungen mittels eines Glühprozesses neutralisiert wur-

den, auf die richtige Länge gebracht. Bild 1a zeigt schematisch diesen Prozess.

Die Restspannungen, eingebracht während des Vorbiegens, führen beim aufgeschnittenen, spannungslosen Ring zu einem geöffneten Ring mit einem bestimmten, aber anderen Radius (Bild 1b). Dieser Radius wird „curling“ Radius genannt. Verschiedene Parameter können diesen Radius beeinflussen, zum Beispiel der Durchmesser der Vorbiegerollen.

3 Optimales Restspannungsprofil

Der Ring hat im Variatorbetrieb zwei maximale Biegespannungssituationen:

- Der Ring ist gerade (ungebogen); das bewirkt maximale Zugspannung an der Innenseite.
- Der Ring wird zum minimalen Laufradius gebogen; an der Außenseite herrscht maximale Zugspannung.

Bild 1b zeigt diese Situationen, wobei die Zugspannungen, deren Ursache das Einklemmen des Bandes ist, nicht berücksichtigt sind. Die maximale Zugspannung aufgrund der Biegung sind mit σ_{pb} bezeichnet.

Die optimale Situation (Bild 1b) ist erreicht, wenn die Zugspannungen aus der Biegung an Innen- und Außenseite des Ringes gleich sind. Das liegt vor, wenn der Faktor zwischen „curling“-Radius R_{curl} und minimalem Laufradius im Variatorbetrieb R_{min} gleich 2 ist [1]:

Autoren

Ir. Francis van der Sluis
 Ir. Arjen Brandsma
 Ing. Jan van Lith
 Ing. Koenraad van der Meer
 Ir. Arie van der Velde
 Ir. Bert Pennings
 Van Doorne's Transmissie b.v.
 Bosch Group
 P.O. Box 500, 5000 AM Tilburg, NL
 Tel.: 00 31/13 46 40 440
 E-Mail: francis.vandersluis@nl.bosch.com

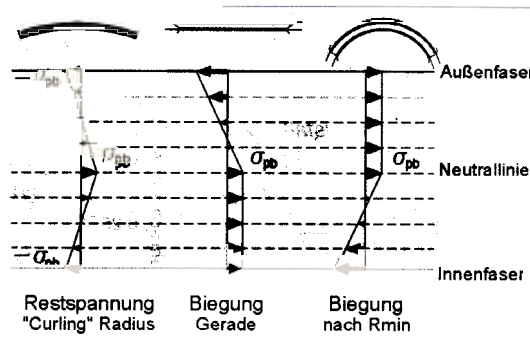
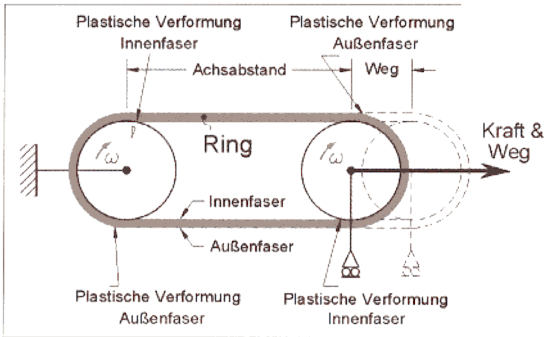


Bild 1a und b

a) Vorbiegeprozess: Längendefinition und mechanische Restspannungseinführung
 b) Restspannungen und Biegespannungen beim Variatorbetrieb

$$R_{curl} = f_{pb} \cdot R_{min} \quad (1)$$

wobei $f_{pb} = 2$ ist.

4 Neue Erkenntnisse

In Gl. (1) wird davon ausgegangen, dass der Ring einen rechteckigen Querschnitt hat. Praktisch ist dies nicht der Fall. Nach der Fertigung hat der Ring einen über der Breite gekrümmten Querschnitt mit einem Radius, „crowning“-Radius R_{crown} genannt.

Gl. (1) kann daher modifiziert werden, wobei mit unterschiedlichen maximalen Faserabständen für Innen- und Außenseite, δ_i und δ_o , gerechnet wird.

$$R_{curl} = \frac{\delta_i + \delta_o}{\delta_o} \cdot R_{min}$$

mit

$$f_{pb} = \frac{\delta_i + \delta_o}{\delta_o} \quad (2)$$

Für den Ring einer bestimmten Breite und Dicke übersteigt der Vorbiegefaktor den Wert 2: Für große Krümmungsradien nähert sich der Vorbiegefaktor dem Wert 2 an, wie Bild 2b zeigt.

Beim Biegen eines Querschnitts spielt der „antiklastische Biegungs“-Effekt eine Rolle. Dieser Effekt entsteht aufgrund der Querkontraktion des Werkstoffs; er ändert den Querschnitt. Dabei ändert sich hauptsächlich der Krümmungsradius des Ringes. Wird aber ein „zurückgebogener“ Ring auf einen kleineren Radius hin verbogen, so wird der Querschnitt

flacher, und der mittlere Krümmungsradius nimmt zu. Während des Geradebiegens nimmt der Krümmungsradius hingegen ab.

Das wirkt sich auf Spannungen aus: Die maximale Zugspannung an der Innenseite wird größer als die maximale Zugspannung an der Außenseite.

Für eine optimierte Situation mit gleichen Zugspannungen bedeutet dies, dass die Innenfaser entlastet werden muss. Um dies zu erreichen, soll der „curling“-Radius größer sein. Das bedeutet, den Vorbiegefaktor weiter zu erhöhen, was mittels der Faktoren f_i und f_o umschrieben wird.

$$R_{curl} = \frac{f_i \cdot \delta_i + f_o \cdot \delta_o}{f_o \cdot \delta_o} \cdot R_{min} \text{ oder} \quad (3)$$

$$R_{curl} = \frac{(f_i/f_o) \cdot \delta_i + \delta_o}{\delta_o} \cdot R_{min}$$

Der neue Vorbiegefaktor kann entsprechend Gl. (3) beschrieben werden. Die Faktoren f_i und f_o wurden mit der FE-Analyse geschätzt, wobei im allgemeinen $f_i > f_o$ gilt. Bild 3a zeigt die Vorbiegekurve, die mit der Gl. (3) berechnet wurde.

5 Testdefinition

Ringe, gefertigt nach heutigen Fertigungseinstellungen, zeigen bei Band-Dauerversuchen Ermüdungsbrüche, deren Bruchanfang hauptsächlich an der Innenseite des inneren Rings liegt. Wie beschrieben, kann diese Ringseite mit einem Vorbiegeprozess

entlastet werden, was zum größeren „curling“-Radius führt.

Zur Bestätigung der Theorie wurden Dauerversuche durchgeführt. Testergebnisse mit einem 30/12-Band werden hier beschrieben: Das ist ein Band mit einer Elementbreite von 30 mm und 2 mal 12 Ringen.

In der Fertigung wurde mit optimierten Einstellungen versucht, den besten / optimalen Vorbiegefaktor zu erreichen. Bild 3a zeigt den Unterschied zwischen einem Referenzband und der optimierten Version. Das Bild entspricht einer Erhöhung des Vorbiegefaktors von ungefähr 2 auf 2,8.

Die Bänder wurden mittels eines „Overload Fatigue Tests“ (OFT) geprüft. Der OFT ist ein Dauerversuch, in dem ein Band in einer festen Übersetzung (von einem E-Motor angetrieben Prüfstand) überlastet wird.

In diesem Versuch werden die üblichen Belastungen im Fahrzeugbetrieb und beim standardgemäßen VDT-Long-Durability-Cycle (LDC)-Test überschritten, um kürzere Versuchsdauer zu erreichen.

6 Ergebnisse und deren Umsetzung in ein neues Produkt

Bild 3b zeigt die Ergebnisse dieser Versuche. Die neue Konstruktion liefert eine Lebensdauerverbesserung vom Faktor 1,7.

Die Dauerversuche mit Ringen, die mit den neuen Fertigungsdaten hergestellt wurden, zeigen, dass beim Bandausfall (Grund: Ringermüdung) der Bruchanfang jetzt auch an der Außenseite des inneren Rings auftritt. Diese

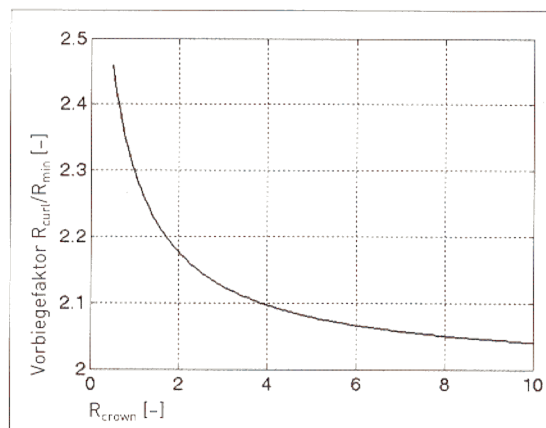
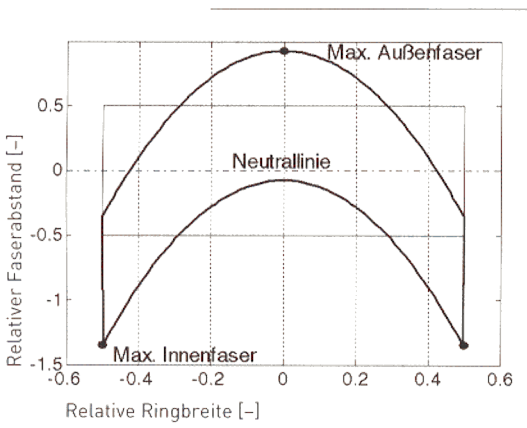


Bild 2a und b

a) Geometrie rechteckiger gegenüber gekrümmten Querschnitt
 b) Vorbiegefaktor abhängig von der Krümmung

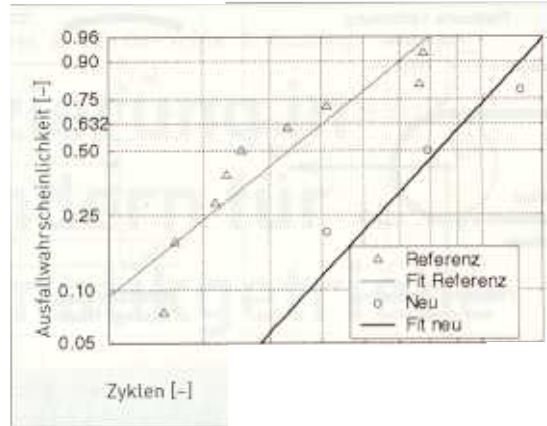
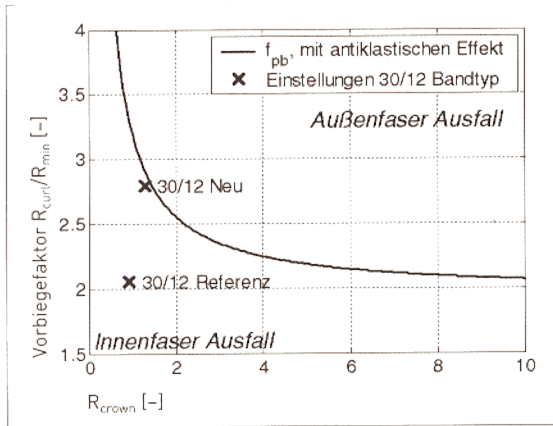


Bild 3a und b

a) Vorbiegefaktoren Referenz versus neuem Entwurf
b) Dauerversuchsergebnisse, Weibull Verteilung 30/12 Daten

Ergebnisse stützen die hier vorgestellte Theorie.

Das Schubgliederband mit optimiertem „curling“- und „crowning“-Radius hat eine deutlich verbesserte Leistungsdichte. Die neuen Fertigungseinstellungen führten zu einem neuen Band. VDT arbeitet zur Zeit mit fünf verschiedenen Fahrzeug- und Getriebeherstellern aus Japan, Europa und den USA zusammen, um die Einführung dieses neuen Getriebes in den CVT-Markt sicherzustellen. Produktionsbeginn für die erste Anwendung war 2002, weitere folgen.

Die erste Anwendung des neuen Schubgliederbands ist im Nissan Murano. Dieses Fahrzeug wurde während der „New York International Autoshow“ im Frühjahr 2002 vorgestellt: Ab Dezember 2002 ist das Kfz mit Schubgliederband CVT erhältlich. Die technischen Spezi-

fikationen dieses Fahrzeugs sind in der Tabelle 1 zusammengefasst.

Zur Zeit ist der Nissan Murano mit seiner Motorspezifikation von 350 Nm/180 kW und seinem Wandler mit Faktor 2,0 die leistungsstärkste stufenlose Getriebeanwendung mit dem größten primärseitigem Antriebsmoment.

7 Zusammenfassung

- a) Untersuchungsergebnisse stützen die Hypothese, dass eine erhöhte Lebensdauer des Schubgliederbands aufgrund der Optimierung des „curling“- und „crowning“-Radius der Ringe erreicht werden kann: Mit einfachen Maßnahmen ist eine Verbesserung von 70 % zu erreichen.
- b) Diese Maßnahmen wurden in eine neue Kon-

struktion eingebracht, was zu höherer Leistungsdichte des Schubgliederbands führte. Das erste derartige stufenlose Getriebe ist im neuen Nissan Murano mit 350 Nm/180 kW und einem 30/12 Schubgliederband eingebaut.

- c) Das Vorbiegen der Schubgliederbandringe bringt Restspannungen in das Material ein. Diese helfen, die Biegespannungen in den Ringen während des Variatorbetriebs zu verringern. Das führt zur höheren Leistungsdichte des Bandes.
- d) Wenn antiklastische Effekte vernachlässigt werden, liefert die Theorie für Ringe mit einem rechteckigen Querschnitt einen optimalen Vorbiegefaktor von 2.
- e) In diesem Beitrag wurde ein 1-dimensionales Modell für die „curling“-Radiusoptimierung beschrieben. Das Modell beschreibt die Effekte der „crowning“-Radien und antiklastischer Biegung.
- f) Werden mit dem neuen Modell Ringe mit typischen „crowning“-Radien berechnet, die vom antiklastischen Effekt beeinflusst werden, so ergeben sich Vorbiegefaktoren, die deutlich über den Faktor 2 steigen.

Nissan Murano			
Motor		Getriebe	
Modell	3.5 l V6	Wandler	Ja, T _c -Faktor 2.0
Max. Leistung	180+ kW/240+ PS bei 6000 U/min	Getriebetyp	Schubgliederband CVT
Max. Drehmoment	350 Nm bei 4000 U/min	Bandtyp	30/12 neuer Entwurf
		Spreizung	5.4
		Max. Band Drehmoment	500+ Nm

Tabelle 1

Antriebspezifikation
Nissan Murano mit
Schubgliederband CVT

Literatur

- [1] van der Sluis, F.; Brandsma, A.: Stress reduction in push belt rings using residual stresses. Vortr. VDI-EKV-Tagung „CVT 2002 Congress“, München, 7./8.10.2002. Langfassung in: VDI-Ber. Nr. 1709. Düsseldorf: VDI 2002