

Ein Leitfaden zur Herstellung von Schlüsselkomponenten für mikrofluidische Geräte

Medizinische Materialien und Technologien



Ein Leitfaden zur Herstellung von Schlüsselkomponenten für mikrofluidische Geräte

Autoren: Jake Eldridge, Sr. Ingenieur für Fertigungstechnik, 3M Health Care

Einführung

Mikrofluidische Geräte können den Unterschied zwischen Gesundheit und Krankheit signalisieren. Sie überwachen Blutzucker, genetische Biomarker, untersuchen auf Krebs und mehr. Sie können Krankheitserreger und genetische Biomarker nachweisen. Bei der Konstruktion und Herstellung dieser wichtigen Werkzeuge sind Genauigkeit und die richtigen Materialien von größter Bedeutung.

Die Herstellung mikrofluidischer Geräte erfordert anspruchsvolle Techniken. Diese empfindlichen Streifen oder Discs transportieren, schützen und erkennen wichtige Proben von Blut oder anderen Flüssigkeiten, die Patienten und ihrem Pflegepersonal die entscheidenden Informationen liefern, die sie benötigen. Mikrofluidische Geräte sind in der Regel klein und haben komplizierte Kanäle und Schaltkreise, deren Zusammenbau und Herstellung viel Aufmerksamkeit und Sorgfalt erfordert.

In diesem Beitrag werden Verarbeitungsaspekte und Materialeigenschaften gängiger mikrofluidischer Gerätekomponenten behandelt. Ziel ist es, Herstellern von mikrofluidischen Geräten einen Einblick in erfolgreiche Fertigungsstrategien bei der Entwicklung von Produkten auf dem neuesten Stand der Technik zu geben.



Mikrofluidische Gerätebandkomponenten: Was sind ihre Funktionen und Eigenschaften?

Es ist wichtig, die Funktion jeder Komponente zu verstehen, die zur Herstellung mikrofluidischer Geräte verwendet wird, bevor wir sie klassifizieren.

Substrate und Trägermaterialien

Funktionen

Ein Substrat oder eine Unterlage ist wie die Wirbelsäule des Bandes. Es ist die Komponente, die die mechanischen Eigenschaften des Bandes bestimmt. Der Trägertyp sollte je nach gewünschter Leistung des Klebebandes gewählt werden, ob es dick und starr, anpassungsfähig, reflektierend oder in manchen Fällen dehnbar sein muss.

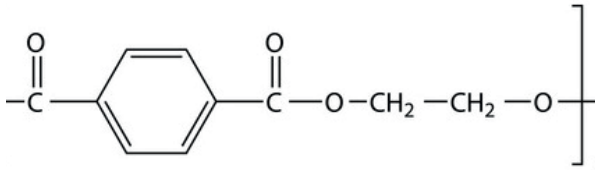
Bei mikrofluidischen Bändern werden manchmal Oberflächenmodifikationen hinzugefügt, um je nach gewünschter Funktion hydrophile Eigenschaften zu ermöglichen. Zusätzlich können Oberflächen behandelt werden, um die Haftung zu verbessern oder die Klebstoffablösung zu fördern.

Eigenschaften von verschiedenen Substraten

Nachfolgend finden Sie eine kurze Liste der gängigen Substrate, die in mikrofluidischen Geräten verwendet werden:

- Biaxial orientiertes Polypropylen (BOPP): bietet gute Klarheit, geringe Autofluoreszenz bei beachtlicher Festigkeit und ist einfach zu verarbeiten in Bezug auf Beschichtung, Druck und Schneiden. Es sollte besonders darauf geachtet werden, dass die Oberfläche bei der Verarbeitung nicht verkratzt.

- Polyethylenterephthalat (PET): natürlich klar mit guter Festigkeit. Geringe Feuchtigkeitsübertragung. Einfaches Hinzufügen einer Oberflächenbehandlung.



- Sehr einfach zu verarbeiten, zu beschichten, zu schneiden usw. Gute Steifigkeit bei geringerer Anfälligkeit für plastische Verformung im Vergleich zu BOPP.
- Alufolie: in vielen Formen von Legierungen und Härtegraden erhältlich. Die Oberflächeneigenschaften können je nach Bearbeitungs-/Fräsbedingungen leicht verändert werden. Viele Aluminiumkonfigurationen sind veränderbar und können die Form der Oberfläche, auf die sie aufgebracht werden, beibehalten und bieten eine verbesserte Wärmeleitfähigkeit.



Eigenschaften häufig verwendeter Mikrofluidik-Klebstoffe

Silikon-Klebstoffe: bieten eine sehr gute Haftung bei Kontaktanwendungen mit niedriger Oberflächenenergie (LSE). Einige Varianten haben eine sehr geringe Anfangshaftung und erhöhen die Haftung, wenn ausreichend Druck ausgeübt wird. Dies kann wünschenswert sein, wenn eine Neupositionierung erforderlich ist (z. B. auf einer Platte oder einem Well Cover). Bestimmte silikonbasierte Formulierungen bieten eine sehr gute Beständigkeit gegen Zersetzung während der PCR-Verarbeitung. Silikone kosten in der Regel mehr als Klebstoffsysteme auf Acrylatbasis.

Acryklebstoffe: bieten eine gute Haftung auf einer Vielzahl von Oberflächen und sind in der Lage, über einen längeren Zeitraum haften zu bleiben. Sie können so formuliert werden, dass sie für eine Reihe von Haftungs- und Steifigkeitsprofilen geeignet sind, die erforderlich sind, um die kritische Kanalstruktur zu erhalten und eine gute Verarbeitbarkeit bei der Herstellung zu ermöglichen. Acryklebstoffe können kostengünstiger sein als Silikonklebstoffe.

Klebstoffe

Funktionen

In der einfachsten aller Definitionen ermöglichen Klebstoffe die Verbindung eines Bandes mit einer Oberfläche. In der Mikrofluidik werden häufig Klebebänder auf Platten geklebt, um den Rand zwischen Probe und Vertiefung abzudichten. Klebebänder können auch auf andere Komponenten geklebt werden, um ein Gerät aufzubauen (z. B. Lab-on-a-Chip, Teststreifen). Bei diesen Anwendungen kommen die Klebstoffe regelmäßig mit Proben und Reagenzien in Kontakt und müssen daher chemisch stabil sein. Die Polymerase-Kettenreaktion (PCR) wird zur Sequenzierung von DNA verwendet. Die Geräte können während der Lagerung und Verwendung Temperaturschwankungen von unter dem Gefrierpunkt bis zu 98 °C ausgesetzt sein. Während der Verarbeitung ist es aufgrund der erheblichen wiederholten Temperaturwechsel wichtig, dass der Klebstoff nicht seine Haftung verliert und nicht beginnt, sich zu zersetzen und möglicherweise die Reaktion zu verunreinigen.

Liner

Funktionen

Liner sind die unbesungenen Helden eines Bandsystems. Sie bieten oft eine saubere, konsistente Oberfläche, auf die der Klebstoff aufgetragen werden kann (mehr dazu im Abschnitt „Laminierung“ weiter unten) und schützen die Klebstoffoberfläche vor Exposition und Beschädigung. Liner können als Verarbeitungshilfsmittel verwendet werden (Prozess-Liner) oder bis zur endgültigen Verwendung beim Endverbraucher beim Klebeband verbleiben (Produkt-Liner). Aufgrund der komplizierten und präzisen Art der Beschichtung und Verarbeitung von mikrofluidischen Geräten werden häufig PET oder BOPP-Liner (siehe unten) verwendet, um Toleranzen und saubere Kantenschnitte einzuhalten.

Eigenschaften von verschiedenen Trägermaterialien

Genau wie bei einem Klebeband gibt es Liner in zahlreichen Substraten, die auf die Bedürfnisse des Anwenders abgestimmt sind.

- Papier wird häufig verwendet, wenn ein bedruckter Liner benötigt wird oder wenn der Anwender einen relativ preiswerten Liner mit wesentlicher Struktur und Schutz benötigt. Papierliner, die im medizinischen Bereich verwendet werden, haben in der Regel mindestens eine Seite, die mit einer Polyolefinschicht beschichtet ist, damit eine Trennbeschichtung aufgetragen werden kann, ohne in das Papier einzudringen. Oberflächenmodifikationen können Perforationen für das Feuchtigkeitsmanagement beinhalten.
- BOPP ist wegen seiner gleichbleibenden Dicke, Festigkeit und optischen Eigenschaften wünschenswert. Es ist im Allgemeinen teurer als Papier, aber preiswerter als PET. Oberflächenmodifikation oder Priming werden manchmal bei BOPP-Substraten verwendet, um die Verankerung der Trennchemie zu ermöglichen (wie im nächsten Abschnitt beschrieben)
- PET ist ein in vielen Branchen häufig verwendetes Trägermaterial aus Polyester. Es bietet sehr gleichmäßige, steife Eigenschaften mit einem hohen Verhältnis von Festigkeit zu Dicke. PET ist wünschenswert, wenn die Schichtdicke und die Präzision des Stanzens für den Verarbeiter oder Endverbraucher wichtig sind. PET ist die teuerste Option. Bei PET-Linern kann eine Oberflächenmodifikation oder eine Grundierung verwendet werden.

Liner-Trennbeschichtungen

Damit ein Liner richtig funktioniert und sich beim Abziehen vom Kleber löst, ist auf seiner Oberfläche fast immer eine Art Beschichtung aufgebracht. Diese Beschichtung wird oft als Trennbeschichtung oder Chemie bezeichnet und besteht in der Regel aus einem gehärteten Silikon, Fluorsilikon oder manchmal auch aus Fluorkohlenstoffvarianten. Acrylatklebstoffe werden häufig mit Silikontrennbeschichtungen gepaart. Fluorsilikon und Fluorkohlenstoff-

Trennbeschichtungen werden in Verbindung mit Silikonklebstoffen verwendet, da jede Verwendung einer reinen Silikontrennchemie zu einem „Blockieren“ oder „Verblocken“ mit dem Klebstoff führen würde und nicht richtig funktioniert.

Einfach beschichtete Liner

Manchmal als einseitige Liner bezeichnet, bezieht sich dies auf die Anzahl der Seiten mit Trennchemie. Einfach beschichtete Liner werden hauptsächlich für einfach beschichtete Bänder verwendet, können aber manchmal mit einem anderen einfach beschichteten Liner für doppelt beschichtete Band- und Transferbandkonstruktionen verwendet werden.

Doppelt beschichteter Liner

Manchmal als zweiseitige oder Tandem-Liner bezeichnet, bezieht sich dies auf ein Linersubstrat mit zwei Seiten Trennbeschichtung. Die Release-Chemie auf beiden Seiten des Liners ist fast immer unterschiedlich, um einen sogenannten differentiellen Release-Gradienten zu bieten. Dieser Unterschied ist für Transferklebstoffe extrem wichtig, da die Diskrepanz in der Bindung das Ablösen von einer Seite und die Verankerung auf der anderen Seite während der Verarbeitung ermöglicht. Mehr zu diesem Thema finden Sie weiter unten im Abschnitt „Transferkleber“. Doppelt beschichtete Liner können auch mit einem einfach beschichteten Band verwendet werden, um eine rückseitige Oberflächenbehandlung eines Substrats ebenfalls zu schützen.

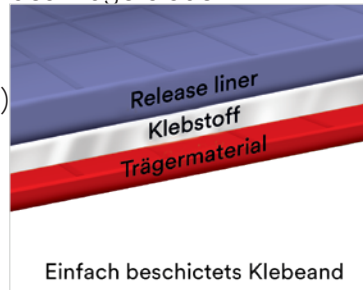
Bandtypen: Einzelne Beschichtungen, doppelte Beschichtungen, Transfer-Bänder

Bahnverarbeitbare Folien und Lamine werden oft nach ihrer Funktion und ihrem Aussehen kategorisiert.

Einfach beschichtete Bänder

Einfach beschichtete Klebebänder bieten einen auf einem Substrat verankerten Klebstoff, der Festigkeit, Anpassungsfähigkeit und in einigen Fällen eine Oberfläche bietet, auf die eine weitere Komponente geklebt werden kann (Lagenbildung). In ihrer fertigen Ausführung gibt es einfach beschichtete Bänder mit oder ohne Liner. Wenn die Konstruktion keinen Liner

enthält, wird die Rückseite des Substrats eine Art Oberflächenbehandlung, Beschichtung oder Modifikation aufweisen, die das Ablösen des Klebstoffs beim Abwickeln ermöglicht. Einfach beschichtete Klebebänder decken eine sehr große Bandbreite an Laminaten auf dem Markt ab und werden oft weiter in Kategorien unterteilt, die auf der Besonderheit des Trägers oder Klebstoffs basieren (z. B. Vliesklebebänder, Silikonklebebänder usw.)

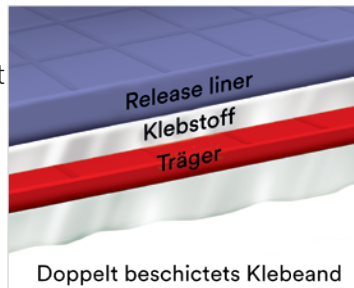


Einfach beschichtets Klebeband

Ein doppelt beschichtetes Klebeband besteht aus einem einzigen Trägermaterial, das auf beiden Seiten mit Klebstoffen beschichtet ist. Je nach Verwendungszweck können die Klebstoffe gleich sein, unterschiedliche Auftragsgewichte aufweisen, um verschiedene Haftungs-niveaus zu erreichen, oder es kann sich um völlig separate Klebstoffsysteme handeln. Doppelt beschichtete Klebebänder können entweder mit zwei einfach beschichteten Linern oder mit einem doppelt beschichteten Liner, der beide Klebstoffschichten abdeckt, hergestellt werden.

Doppelt beschichtetes Klebeband

Ein Abstandshalterband ist ein doppelt beschichtetes Band, das für mikrofluidische Teststreifen hergestellt wird. Dieses Band hat eine präzise Gesamtdicke, die dem Teststreifen Abstand, Kanalhöhendicke und Struktur verleiht.



Doppelt beschichtets Klebeband

Transfer-Klebstoffe

Transferklebstoffe sind in vielerlei Hinsicht wie doppelbeschichtete Klebebänder – der primäre Unterschied ist das Fehlen eines Trägers. Der Aufbau eines Transferklebstoffs muss entweder ein beidseitig beschichteter Liner oder zwei einseitig beschichtete Liner sein. Es ist sehr wichtig, dass der Unterschied der Ablösekraft der Liner ausreichend ist. Im Allgemeinen wird ein Unterschied der Ablösekraft von 3x als ideal angesehen. Ein Transferklebstoff mit einer Differenz von 2x kann ausreichen, erfordert aber möglicherweise

besondere Sorgfalt beim Abwickeln des Bandes, um keine „Liner-Verwechslung“ zu verursachen. Eine Liner-Verwechslung tritt auf, wenn die Klebstoffverankerung zwischen zwei Trennbeschichtungen ähnlich ist – in diesem Fall beginnt der Liner zu rupfen oder zu reißen, was seine Verwendung oder Verarbeitung nahezu unmöglich macht.



Übersicht über den Herstellungsprozess

Nachdem die grundlegenden Komponenten des Geräts ausgewählt wurden, ist es nun an der Zeit, sie herzustellen. Die folgende Übersicht über die Herstellung folgt denselben sieben primären, aufeinanderfolgenden Schritten, die man zur Herstellung eines mikrofluidischen Geräts verwenden würde; beginnend mit der Erstellung eines Substrats, der Modifizierung, der Beschichtung, der Aushärtung, der Inspektion, dem Schneiden und schließlich dem Zusammenbau eines fertigen medizinischen Geräts.

Polymer-Extrusion von Folien

Polymerfolien werden aufgrund ihrer hohen Dimensionskontrollierbarkeit regelmäßig in mikrofluidischen Bauteilen als Substrate und Liner eingesetzt.

Prozessübersicht

Die Polymerextrusion ist eine komplexe Wissenschaft, die auf der Idee basiert, das Eingangsgranulat oder Harz (Feed) auf eine verarbeitbare Temperatur zu erhitzen, eine Schmelze zu komprimieren und die Schmelze mit einer gewünschten Geschwindigkeit in eine Düse zu dosieren, um eine Folie mit einer gleichmäßigen, gewünschten Dicke zu gießen und abzukühlen.

Beginnen wir mit dem Extruder selbst; einfach erklärt ist es ein Netzwerk von modularen Zylindern, die eine oder zwei Extrusionsschnecken umschließen. Das Granulat wird durch einen Trichter in den Extruder gefördert und auf eine Solltemperatur, bezogen auf die Schmelztemperatur des Polymers, aufgeheizt. Wenn das Material weicher wird, wird es von der Schnecke in den Extruderzylinder gepresst

und beginnt sich zu verdichten.¹ Der Druck baut sich auf und die sogenannte „Schmelze“ beginnt sich zu bilden.¹ Die Schmelze bewegt sich weiter den Zylinder hinunter zum letzten Schritt der Dosierung,¹ wo Temperatur und Durchfluss fein gesteuert werden, um die Durchflussrate der Schmelze aus dem Extruder zu beeinflussen.

Ein Hinweis zu Einschneckenund

Doppelschneckenausführungen: Auf hohem Niveau bietet eine Doppelschnecke einen stabileren Materialfluss und die Möglichkeit, einen höheren Feuchtigkeitsgehalt in der Schmelze zu verarbeiten, obwohl sie höhere Betriebskosten und mehr zu wartende bewegliche Teile hat.

Wenn die Schmelze den Extruder verlässt, fließt sie über einen isolierten Schlauch zu einer Düse, wo die Schmelze kanalisiert und weiter dosiert wird, um sich zu einem Vorhang mit der gewünschten Breite und Dicke auszubreiten, normalerweise durch eine Falldüse. Die Tropfenform sollte über der Gießfläche oder dem Gießspalt aufgestellt werden und die Schwerkraft nutzen, um den Schmelzeffluss auf die Gießfläche zu unterstützen. Der Vorhang wird entweder direkt auf eine gekühlte Trommelwalze oder auf einen Träger gegossen (der im Wesentlichen als Trennfolie für extrudierte Folien dient), wobei die Schmelze mit einer Geschwindigkeit abgeschreckt wird, die den Eigenschaften des/der gewählten Polymers/ Polymere entspricht. Einige Techniken, die sicherstellen, dass die abgeschreckte Schmelze auf der Kühltrommel verbleibt, sind Nipping (unter Verwendung eines lösungsmittelbeschichteten Laminierpalts), statisches Pinning und Air Pinning. Zusätzlich kann ein Luftmesser (für das Air-Pinning) beim Abschrecken einer Schmelze während des Gießens helfen. Wenn Sie diese Kühltechnik verwenden, sollte die Bahn genau auf Luftblasen überwacht werden.

Wenn die Schmelze in der gewünschten Endproduktstärke gegossen wird, durchläuft sie das Standardbahnhandling und wird als Fertigprodukt aufgewickelt. Da biaxial orientierte Folien jedoch häufig in mikrofluidischen Gerätekonstruktionen verwendet werden, ist die Verarbeitung hier nicht zu Ende. Biaxiale Orientierung bedeutet, dass die Folie in zwei Richtungen gedehnt wird, wodurch sich die Polymerketten verlängern und die Folie an Festigkeit gewinnt. Die Folie wird

sowohl in Maschinenrichtung (Abwärtsbahn) als auch in Querrichtung (Querbahn) über einen Längenorientierer bzw. einen Spannrahmen gestreckt. Der Längenorientierer funktioniert durch schnelles Erwärmen der Bahn und sofortiges Dehnen mittels angetriebener Walzendifferenzialgeschwindigkeit. Ein Spannrahmen funktioniert, indem er die Seite der Bahn mit Klammern an divergierenden Bahnen ergreift und durch eine Reihe von Heizofenzonen führt.

Nach dem Dehnen und Verbreitern wird die Bahn einem Randbeschnitt unterzogen, um die Bereiche zu entfernen, die durch die Clips im Spannrahmen verformt wurden.

Eine Anmerkung zur Fluoreszenz von Kunststofffolien

Der Fluoreszenzgrad der extrudierten Folien, die häufig in mikrofluidischen Geräten und Abdeckbandanwendungen verwendet werden, kann die Erkennung von Probensignalen während der Prüfung beeinträchtigen. Wenn das Endprodukt empfindlich gegenüber Fluoreszenzstörungen ist, wird empfohlen, die Fluoreszenz ausgewählter Materialien zu bewerten.

Aluminiumfolien herstellen

Aluminiumfolie als Substrat findet aufgrund ihrer Anpassungsfähigkeit, ihres Reflexionsvermögens und ihrer Durchstoßbarkeit routinemäßig ihren Weg in mikrofluidische Anwendungen, vor allem in Abdeckbändern und molekulardiagnostischen Geräten mit PCR.

Prozessübersicht

Die Aluminiumproduktion ist ein riesiger Industriezweig und der Produktionsumfang von der Mine bis zur Mühle umfasst viele Schritte. Der Umfang dieser Übersicht konzentriert sich ausschließlich auf das Walzen von Aluminiumspulen im Walzwerk. Spulenmaterial wird in der Regel mit einer dickeren Dicke angeliefert, als sie für mikrofluidische Produkte verwendet werden kann, und muss auf eine dünnere Dicke gewalzt werden. Dieser Walzschritt ermöglicht dem Verarbeiter auch eine Feinabstimmung der gewünschten Oberflächenbeschaffenheit der Ausgangsfolie.

Das eingespeiste Spulenmaterial wird in einen Arbeitswalzenspalt geführt, der in der Regel mit einer oder mehreren Stützwalzen pro Arbeitswalze unterstützt wird, um die hohen Kräfte auszuüben, die zur Verformung des Aluminiums notwendig sind. Dort kann die Spule mehrere Durchgänge durch Arbeitswalzenspalten mit schrittweisem Spaltmaß durchlaufen, um eine gewünschte Foliendicke zu erreichen. Verschiedene Warm- oder Kaltwalzverfahren können eingesetzt werden, um Kaltverfestigung zu vermeiden oder zu induzieren.² Viele Folien, die in der Mikrofluidikindustrie verwendet werden, haben einen gewissen Grad an Kaltverfestigung, der der Folie zusätzliche Steifigkeit verleiht, was bei einigen Bandkonstruktionen nützlich ist.

Im letzten Arbeitsschritt durchläuft die Folie einen Walzenspalt, der der Folie die gewünschte Oberflächenbeschaffenheit verleiht, die in direktem Zusammenhang mit der Oberfläche der Walze steht. Der Industriestandard definiert die Oberfläche als „mill finish“ – relativ rau, oder „bright finish“ – eine spiegelähnliche Oberfläche, mit unterschiedlichen Graden dazwischen. Es ist üblich, dass Folien als zwei Bahnen Rücken an Rücken durch einen Walzenspalt laufen, um den Durchsatz zu erhöhen. Dadurch erhalten die Folienbahnen dort, wo sie durch den Spalt in Kontakt sind, jeweils eine stumpfe Seite. Um eine Folie mit gleichmäßiger Oberfläche auf beiden Seiten zu erhalten, muss sie als eine einzige Bahn durch den Walzenspalt laufen.

Das Gegenteil von dehnungsgehärteten Folien sind erweichte Folien für Abdeckbänder für Mikrotiterplatten. Diese haben oft eine sehr dehnbare Beschaffenheit, um die Anpassungsfähigkeit und Haftung an den Rändern der Probenvertiefungen zu gewährleisten und es den Nadeln zu ermöglichen, das Abdeckband zu durchstechen, ohne zu reißen. Abdeckbandfolien werden teilweise oder vollständig gegläht, ein Prozess, der die molekulare Struktur der Aluminiumlegierung kristallisiert.³ Der Glühprozess wird entweder vor oder nach dem Walzen des Aluminiums abgeschlossen und erfolgt durch Erhitzen der Folie auf eine legierungsspezifische Temperatur über längere Zeiträume und langsames Abkühlen.

Ein Hinweis zur Legierung

Besonderes Augenmerk sollte auf die Legierungen und Zusammensetzungen der Folie gelegt werden. Eine häufig anzutreffende Legierung ist die der 1XXX-Serie. Diese Serie besteht zu mindestens 99 % aus Aluminium. Diese Legierungen sind korrosionsbeständig und bieten thermische und elektrische Leitfähigkeit.⁴ Andere Aluminiumserien haben andere Zusätze, um spezifische Eigenschaften und Verarbeitbarkeitsstufen zu verleihen.

Hydrophile Oberflächenmodifikationen

Es gibt verschiedene Arten der Oberflächenmodifikation und Techniken, die in der Mikrofluidik eingesetzt werden. Die primäre Oberflächenmodifikation, die für mikrofluidische Gerätekomponenten verwendet wird, sind hydrophile Beschichtungen.

Hydrophile Beschichtungen

Hydrophile Folien finden sich vor allem in Teststreifen und Lab-on-a-Chip-Produkten, die einen Flüssigkeitstransport auf kleinstem Niveau erfordern. Eine hydrophil beschichtete Folie fördert den Flüssigkeitsstrom aufgrund ihrer veränderten Oberflächenenergie.⁵ Um die Hydrophilie eines Substrats wie PET zu erhöhen, wird es in der Regel einer speziellen Behandlung unterzogen, um die Oberflächenenergie zu erhöhen. Hydrophile Beschichtungschemikalien sind oft proprietär und können tensidhaltig oder tensidfrei sein.

Hydrophile Beschichtungen werden am häufigsten mit dem Tiefdruckverfahren aufgetragen, das im Abschnitt „Beschichtung“ weiter unten beschrieben wird. Nach der Beschichtung wird die Bahn zum Trocknen und Aushärten durch einen Ofen geführt. Das Maß für die Hydrophilie wird als Kontaktwinkel bezeichnet.

Klebebeschichtung/Laminierung

Eine präzise und konsistente Klebstoffbeschichtung ist entscheidend für die Funktion von mikrofluidischen Gerätekomponenten. Endanwender von Geräten sind auf extrem kontrollierte Folien- und Klebstoffstärken angewiesen, um empfindliche Produkte herzustellen. Oft bedeutet dies die Regelung des Volumenstroms von Flüssigkeiten auf Mikroliter-Ebene.



Auf Lösungsmittelbasis

Ein lösungsmittelbasierter Klebstoff ermöglicht einen gleichmäßigen Auftrag und eine einfache Beschichtung. Der Lösungsmittelanteil der Lösung wird durch Trocknen des Klebstoffs in großen Öfen entfernt. Klebstoffe und Beschichtungen auf Lösungsmittelbasis sind heute in der Industrie weit verbreitet, jedoch könnte diese Technik in der Zukunft benachteiligt sein; vor allem aufgrund von kostspieligen Produktionsanlagen (Öfen, thermische Oxidationsanlagen) und Umweltvorschriften.

Lösemittelhaltige Klebstoffe können durch viele verschiedene Düsenausführungen auf eine laufende Bahn aufgetragen werden. Die gebräuchlichsten sind Düsen und Tiefdruckzylinder (Tiefdruck). Eine Breitschlitzdüse besteht aus einem geteilten Verteiler mit spezifischen Geometrien und einstellbaren Zonen, die den inneren Düsendruck und letztendlich die Schichtdicke steuern. Einlegescheiben (auswechselbare Abstandshalter), die in den Düsen verwendet werden, ermöglichen spezifische Beschichtungsbreiten und Bahnen, die explizit für jedes hergestellte Produkt gelten.

Eine weitere gängige Beschichtungsmethode für lösemittelhaltige Klebstoffe ist die Walzenbeschichtung mittels Tiefdruckzylinder; sie wird meist für sehr dünne und niedrigviskose Beschichtungen eingesetzt. Diese Methode besteht aus einem Zylinder mit präzise bearbeiteten Kammern, die im Wesentlichen den Klebstoff aus einem Klebstofflösungsbad aufnehmen, in das der Zylinder teilweise eingetaucht ist. Während sich der Zylinder dreht, läuft er unter einer Rakel oder einem anderen Mechanismus hindurch, der überschüssigen Klebstoff abstreift und so die Schichtdicke kontrolliert. Während der Zylinder seine Drehung fortsetzt, wird der in den Kammern verbliebene Klebstoff auf die sich bewegende Bahn aufgetragen, die durch einen Niederdruckspalt läuft.

Lösemittelfreie Klebstoffe

Lösemittelfreie Klebstoffe oder Schmelzklebstoff-Zugaben kommen in Form von Pellets, Harz oder Blöcken aus verschiedenen Verbindungen. Anstatt eine Lösung zu verwenden, um eine Arbeitsviskosität zu erreichen, wie bei der lösungsmittelbasierten Methode, wird bei der Hotmelt-Technik Wärme eingesetzt. Die Einsatzstoffe werden durch einen Extruder geführt, wo sie auf bestimmte Arbeitstemperaturen erhitzt und dann über eine Düse auf das Substrat oder den Liner aufgebracht werden. Diese Klebstoffe benötigen keine Trocknung und sind aufgrund des geringeren Aufwands bei der Verarbeitung oft günstiger als lösungsmittelbasierte Klebstoffe.

Schmelzklebstoffe werden am häufigsten über eine Tropfdüse, wie sie bei der Extrusion verwendet wird, oder eine Kontaktdüse aufgetragen. Eine Kontaktdüse besteht aus einem Verteiler mit einem Spalt, der den Klebstoff zu einem Segment der Düse in physischem Kontakt mit der Bahn führt. Dieser Teil der Düse übt einen leichten Druck auf die Bahn gegen eine Stützwalze aus und hinterlässt eine dünne, gleichmäßige Beschichtung. Einige Eigenschaften dieser Beschichtungstechnik sind proprietär und herstellerspezifisch.

Direkter Klebstoffauftrag

Die Direktbeschichtung ist eine Methode, bei der ein Klebstoff auf das Substrat oder den Träger des Klebebands aufgetragen wird. Aufgrund der komplexen Natur und der Empfindlichkeit vieler mikrofluidischer Substratkomponenten

ist dies keine sehr gängige Praxis. Eine direkte Beschichtung bedeutet, dass das Trägermaterial der gleichen, rauen Umgebung ausgesetzt wird, die für die Trocknung/Härtung des Klebstoffs erforderlich ist, und erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass Fehler in das Trägermaterial eingebracht werden. Der primäre Vorteil einer Direktbeschichtung ist die bessere Verankerung des Klebers auf dem Bauteilsubstrat.

Klebstoff Lamination

Klebstoff wird oft durch Lamination statt durch direkte Beschichtung auf das Substrat von Mikrofluidikgeräten aufgebracht. Bei dieser Methode wird der Klebstoff auf eine Trennfolie aufgetragen, durchläuft die notwendige Trocknung und/oder Aushärtung und wird dann auf das gewünschte Bauteilsubstrat laminiert. Diese Technik ermöglicht die Verwendung von komplexeren Bauteilrückseiten und reduziert das Risiko einer Beschädigung oder Verunreinigung des Bandsubstrats erheblich. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, verschiedene Transferkleberkombinationen mit dem Bauteilsubstrat zu kombinieren. Zu den üblichen Herausforderungen bei der Laminierung gehören das Erreichen einer ausreichenden Haftung auf dem Bandträger und die Auswahl eines Trägermaterials mit geeigneter Trennwirkung.

Laminierdruck: Der Laminierdruck ist entscheidend, wenn zwei (oder mehr) Bahnen miteinander laminiert werden. Die Drucksollwerte hängen vor allem von der Zusammensetzung der Komponenten und der Klebstoffzusammensetzung ab. Wenn der Laminierdruck zu niedrig ist, kommt es zu einer unzureichenden Verankerung des Klebstoffs auf dem Trägermaterial. Ein zu hoher Druck kann zu Klebstoffaustritt oder -fluss führen (insbesondere bei teilausgehärteten/vernetzten Klebstoffen) und kann eine Querstegkurve verursachen. Außerdem kann übermäßiger Druck zu einer geringfügigen Verringerung der Liniengeschwindigkeit an der Vorderkante des Laminatorspalts führen und Kratzer oder Dehnungen in der Bahn hervorrufen.

Druckgleichmäßigkeit: Neben der Wahl des richtigen Sollwertes für den Druck ist es zwingend erforderlich, dass der Druck gleichmäßig in Bahnquerrichtung aufgebracht wird. Ungleichmäßiger Druck kann zu einer winzigen

Dehnung des Klebebandes führen, die eine Rollneigung hervorruft, oder sogar einen leichten Klebstoffaustritt in eine Richtung verursachen. In einigen Fällen kann es jedoch erforderlich sein, die Laminatorwalzen auszutauschen oder die Antriebe auf Motor- oder Lagerschäden zu untersuchen.

Walzentrennbeschichtungen und

-umhüllungen: Trennbeschichtungen oder -umhüllungen werden verwendet, um das Zerkratzen zu verringern oder das Ablösen der Oberseite (Klebeseite) von den Rollen/Walzen bei der Bahnverarbeitung zu fördern. Diese Techniken werden häufig bei der Bahnverarbeitung von mikrofluidischen Bauteilen eingesetzt, da die Substratfilme und -folien extrem anfällig für Kratzer oder andere induzierte Verunreinigungen sein können. Es gibt mehrere Optionen für diesen Zweck, viele davon sind kommerziell erhältlich, einige Technologien sind jedoch proprietär.

Rollenbildung: Nachdem die Bandkonstruktion laminiert wurde, erreicht sie den Wickelschritt. Achten Sie auf die richtige Rollenbildung und Wickelrichtung, um eine ungeschützte empfindliche Oberfläche nicht zu zerkratzen. Der Vorteil von Linern in Bezug auf den Schutz einer Oberfläche, kann oft ein Fluch in Bezug auf die Rollenbildung sein. Zweiseitige Liner werden z. B. üblicherweise zum Schutz oder zum Ablösen von der Rückseite eines Substrats verwendet. Dies macht die Rolle jedoch anfällig für Schlupf und Teleskopieren. Beim Aufwickeln muss der Rolle die nötige Aufmerksamkeit gewidmet werden. Wenn die Rolle anfängt zu teleskopieren, ist die Spannung in der Bahn wahrscheinlich zu hoch und sollte gesenkt werden. Eine weitere Technik zur Abschwächung des Teleskopierens ist die Verjüngung der Spannung, so dass mit zunehmender Größe der Wickelrolle die Spannung abnimmt, um dem sich intern aufbauenden Druck der Wickelrolle entgegenzuwirken. Die Verjüngungsspannung wird in Einheiten von % angegeben, als Anteil des Betrags der Spannungsabnahme von seinem ursprünglichen Sollwert.

Polymerisation

Aushärtungskontrollen: Trockenheit/Extraktionsmittel

Der Zweck der Aushärtung von Klebstoffen ist das Trocknen von Lösungsmitteln und das Entfernen von Monomeren in Klebstoffen. Die Trockenheit eines lösungsmittelbasierten Klebstoffs oder einer Beschichtung ist entscheidend für seine Funktionalität. Die Trockenheit bezieht sich auf die Restlösungsmittel, die in einem lösungsmittelbasierten Klebstoff verbleiben, nachdem er einen Wärmeschrank durchlaufen hat. Bei richtiger Einrichtung ermöglichen temperatur- und luftstromgesteuerte Zonen in einem Ofen eine angemessene Trocknung einer Beschichtung bei einer bestimmten Liniengeschwindigkeit. Ein Extractables-Test kann die Menge an Lösungsmitteln und anderen Chemikalien messen, die nach dem Durchlaufen eines Trockenofens in der Beschichtung verbleiben.

Aushärtungsmethoden

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, eine Beschichtung oder einen Klebstoff basierend auf seiner chemischen Struktur auszuhärten.

Thermische Aushärtung: Abgesehen von der Verwendung eines Ofens zum Trocknen einer lösungsmittelbasierten Beschichtung können Öfen auch zum Aushärten eines Klebstoffs oder einer Beschichtung verwendet werden. Erhöhte Temperaturen oder Verweilzeiten in einem Ofen können die Polymerketten in einer Beschichtung vernetzen und so die Klebrigkeit oder die mechanischen Eigenschaften verändern.

Ultraviolett (UV) Aushärtung:

Ultraviolett Lampen können zum Aushärten von lösungsmittelfreien Klebstoffen oder dünnen Trennmitteln verwendet werden

Beschichtungen auf Liner. Bei der Aushärtung von Trennfolien wird durch das Durchlaufen einer UV-Lampenstation die Menge an „freier“ Chemie (aktive Trennchemikalie oder -verbindung, z. B. Fluorsilikon) verringert, wodurch die Menge an verbleibenden extrahierbaren Stoffen verringert und die Trennkraft einer Folie erhöht wird.

Elektronenstrahl (E-beam): E-Beam wird zum Aushärten oder Vernetzen von Polymerketten verwendet, meist in Klebstoffen, manchmal aber auch zur Sterilisation. Manchmal wird die Elektronenstrahlhärtung bei nachgetrockneten Acrylatbeschichtungen eingesetzt, um einen Klebstoff zu versteifen und seine Viskosität zu erhöhen, damit er die gewünschten Klebeeigenschaften oder mechanischen Eigenschaften erreicht.

Liniengeschwindigkeit/Verweilzeit: Die Verweilzeit ist im Hinblick auf die Aushärtung eines Klebstoffs oder einer Beschichtung von entscheidender Bedeutung, um die gewünschten Restlösemittel, Klebrigkeit und mechanischen Eigenschaften zu erreichen. Bei der Bahnverarbeitung, bei der sich eine kontinuierliche Materialbahn bewegt, steht die Verweilzeit in umgekehrtem Verhältnis zur Bahngeschwindigkeit. Die Trockenheit bzw. der Aushärtungsgrad steht jedoch in direktem Zusammenhang mit der Temperatur bzw. der Energiezufuhr zu einer Bahn. Die zugeführte Energie und die Liniengeschwindigkeit sind dann die beiden primären Stellhebel für die Trocknung und Aushärtung.

Lenkung, Bahnführung und Bildverarbeitungssysteme

Tramming

Unter Tramming versteht man bei der Bahnverarbeitung die Ausrichtung von Walzen und Tragrollen zueinander. Eine andere Möglichkeit, sich die Bahn mit Rollen vorzustellen, ist die dreidimensionale Parallelität zwischen den Rollen in x-, y- und z-Richtung. Ein kleiner Ausrichtungsfehler kann eine ungleichmäßige Spannung in einer Bahn verursachen. Wenn dies geschieht, treten in verschiedenen Bereichen der Bahn winzige Spannungsunterschiede auf, die zu Dehnungen, Kratzern, Falten und Knicken des Materials führen können, das über eine nicht beschnittene Walze läuft. Bei mikrofluidischen Komponenten können Kratzer und andere Defekte die Lichtdurchlässigkeit oder Glätte eines Bandes oder einer Folie verändern, was tiefgreifende Auswirkungen auf das fertige Gerät haben kann.

Bumpering

Bumpering ist eine Technik, die bei der Bahnverarbeitung zur Beeinflussung der Seitenspannung (Querzug) einer laufenden Bahn eingesetzt wird. Beim Bumpering wird ein Band mit hoher Reibung um eine Walze an den Kanten der Bahn gewickelt. Manchmal geschieht dies als Reaktion auf Falten, die in Maschinenrichtung beobachtet werden, oder als reine Vorbeugungsmaßnahme. Bumpering ist eine relativ informelle, aber effektive Methode, um eine seitliche Spannung zu erzeugen. Besonders bei den oft hochempfindlichen Trägermaterialien, die in mikrofluidischen Bauteilen verwendet werden, ist es zwingend erforderlich, auf das Bauteilsubstrat zu achten und zu überlegen, ob das Bumper Tape unerwünschte Kratzer verursachen oder übermäßige statische Aufladung in die Leitung induzieren könnte.

Bahnführungen/Kantenführungen

Bahnführungen, manchmal auch als Linienführungen oder Kantenführungen bezeichnet, werden häufig als Steuersysteme für die Bahnverarbeitung eingesetzt und sind wertvoll für die präzise Beschichtung und das Schneiden von Komponenten für mikrofluidische Geräte. Bahnführungen verwenden Lichtsensoren, um entweder die Kante der sich bewegenden Bahn oder eine Referenzlinie zu verfolgen, die in die Bahn gedruckt sein kann (wenn es eine variable Kante gibt, manchmal bei der Verarbeitung von Schäumen). Diese Sensoren sind in die Logiksteuerung der Anlage eingebunden und ermöglichen es der Maschine, sich in Querrichtung auf jede Verschiebung der Kante oder der Referenzlinie einzustellen. Bahnführungen werden üblicherweise sowohl bei Beschichtungs- und Schneidanlagen als auch bei Verarbeitungslinien eingesetzt.

Vision Systeme

Bildverarbeitungssysteme ermöglichen eine Fehlererkennung und die Möglichkeit des Rollmappings und/oder der Fehlermarkierung. Technologien für Bildverarbeitungssysteme sind breit gefächert und bedeuteten in der Vergangenheit die Verwendung einer Kamera zur Erkennung von Defekten (Kratzer, Flecken, Verunreinigungen) in einer sich bewegenden Bahn, basierend auf einer

Größenoder Lichtkontrastschwelle. Im Zuge des technologischen Fortschritts hat der Einsatz von Infrarot (IR)-Sensoren für weniger empfindliche Anwendungen aufgrund ihrer geringeren Kosten zugenommen. Viele Hersteller wünschen sich Bildverarbeitungssysteme in der Produktion von Komponenten für mikrofluidische Geräte, da sie eine 100%ige Inspektion von nicht konformen Bauteilen bereits in der Entstehungsphase ermöglichen. Dadurch werden die Anzahl der Defekte und die Variabilität im fertigen mikrofluidischen Gerät verringert. Ein weiterer Vorteil eines Bildverarbeitungssystems ist die Möglichkeit, eine Rollenkarte, z. B. aus einem Beschichtungsprozess, in den anschließenden Schneidprozess einzubinden. Dies kann einen „intelligenten Rollenschneider“ alarmieren, um die Bahn neben einem Defekt zu markieren, oder die Bediener alarmieren, um einen Defekt zu markieren oder ganz zu entfernen, was wiederum die Chancen begrenzt, dass ein Defekt ein endgültiges, hochempfindliches mikrofluidisches Gerät erreicht.

Schneiden

In diesem Abschnitt werden drei primäre Methoden des Schneidens für die Bahnverarbeitung von mikrofluidischen Komponenten vorgestellt.

Messerschnitt

Bei dieser Methode wird ein stationäres Messer schräg aufgestellt, um das Material zu schneiden. Es ist gut für dünne Schichten und eine relativ kostengünstige Methode, die einfach einzurichten und einzustellen ist.⁶

Rollenschnitt

Das Rollenschneiden, manchmal auch Quetschschneiden genannt, ist ein Verfahren zum Schneiden von unten nach oben, bei dem ein kreisförmiges Messer die Bandkonstruktion bis zu einer gehärteten Stützrolle durchschneidet.⁶ Vereinfacht ausgedrückt, wird dabei die gleiche Schneidmechanik wie bei einem Pizzaschneider verwendet. Dies ist der gebräuchlichste Schneidtyp und funktioniert für die meisten mikrofluidischen Bänder.

Scherenschnitt

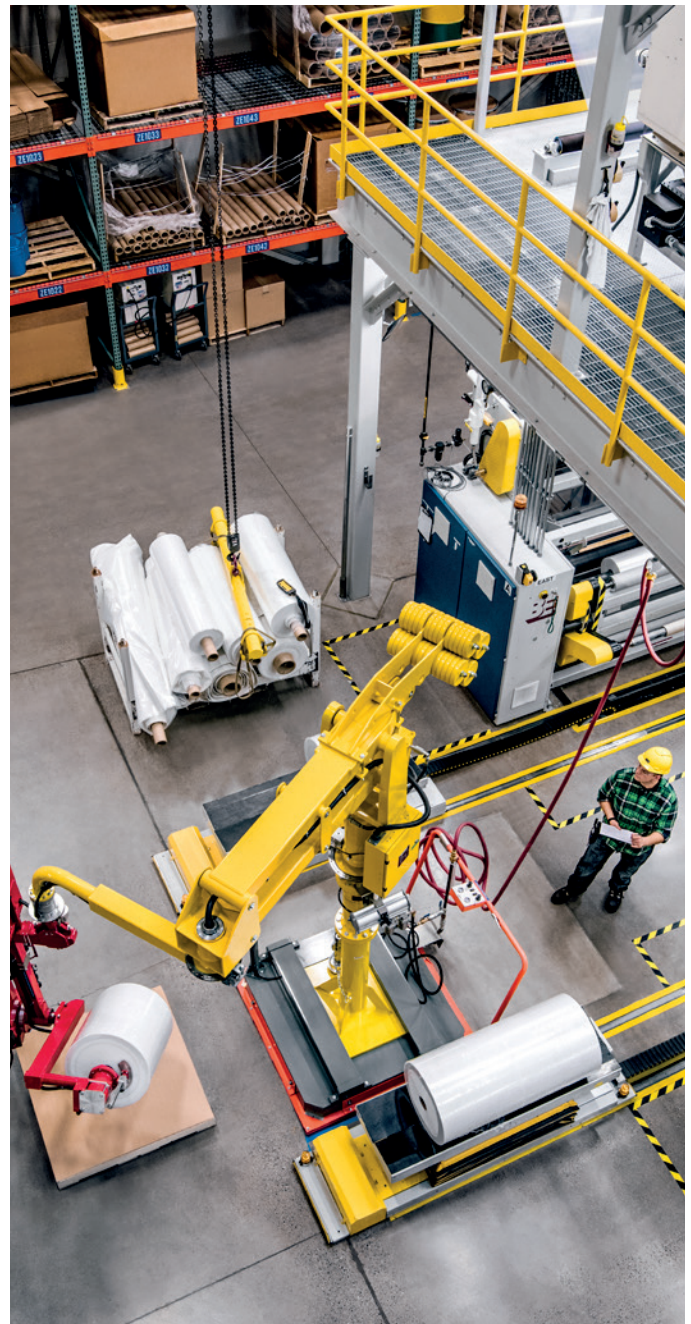
Das Scherenschneiden wird für empfindliche Materialien verwendet, die eine feine Kantenbearbeitung erfordern, oder häufiger für dickere Materialien, wie Aluminiumfolien und dicke Polymerfilme. In diesen Situationen übt ein Rollenschneider oft keinen ausreichend hohen Druck an der Schneidstelle aus, um das Material zu trennen, und verursacht stattdessen einen tiefen Einschnitt im Produkt. Im Gegensatz dazu werden beim Scherenschnitt zwei kreisförmige Klingen verwendet, die im Tandem arbeiten, um das durchlaufende Material zu schneiden.⁶ Die Schneidmechanik zwingt das Material über eine sehr kleine Fläche in verschiedene Richtungen, wodurch das Material wie bei einer Schere getrennt wird. Das Scherenschneiden liefert die beste Kantenqualität der drei Techniken, kann aber kompliziert einzurichten und kostspielig sein, da für jeden Schnitt zwei Schneidwerkzeuge verwendet werden, was einen höheren Wartungsaufwand erfordert.⁶

Konvertierung und Montage

Das Konvertieren und Montieren von mikrofluidischen Komponenten ist in gewisser Weise eine Mikro-Zusammenfassung vieler Elemente, die in diesem Beitrag besprochen werden.

Laminierung anderer Komponenten

Mikrofluidische Geräte werden oft durch den Aufbau oder das Übereinanderlegen von Schichten von Komponenten mit unterschiedlichen internen Geometrien und Eigenschaften hergestellt. Zum Beispiel können Kanäle, die durch Lücken zwischen den Schichten entstehen, den Blutoder Flüssigkeitsfluss ermöglichen. Bei diesen Anwendungen muss die Schichtdicke zwischen den Ebenen genau und präzise sein. Verarbeitungsmaschinen haben oft Sensoren, die Passermarken oder „Augenmarken“ erkennen, die bestätigen, dass die Lamine vor dem Laminieren ausgerichtet sind. Das Laminieren von mehreren Komponenten erfordert auch eine Kantenführung und die richtige Einstellung des Laminators.



Schneiden

Das Schneiden von mikrofluidischen Bauteilen erfolgt in der Regel mit Rotationswerkzeugen oder Lasern.

Rotatives Stanzen: Das rotierende Stanzen ist eine gängige Methode bei der Verarbeitung von Mikrofluidikgeräten. Bei dieser Technik wird ein präzisionsgearbeitetes Stanzwerkzeug mit der gewünschten Form verwendet, um eine Folie oder ein Substrat zu schneiden. Das Werkzeug ist zylindrisch und rotiert gleichförmig mit der sich bewegenden Bahn, um ein flaches Muster zu schneiden. Die Vorteile der Verwendung einer Rotationsmatrize gegenüber dem Laserschneiden liegen in der



höheren möglichen Liniengeschwindigkeit, den niedrigeren Einstiegskosten und der hohen Haltbarkeit. Die Nachteile des Hard-Tooling sind die Kosten für neue Werkzeuge, eine langsamere Durchlaufzeit für neue Werkzeuge und Änderungen sowie eine Ein Leitfaden zur Herstellung von Schlüsselkomponenten für mikrofluidische Geräte 11 etwas geringere Schnittgenauigkeit als beim Laserschneiden und der Wartungsaufwand für die Schneidwerkzeuge.⁷

Laserschneiden und Abtragen: Laserschneiden ist auch bei der Verarbeitung von mikrofluidischen Geräten üblich. Bei diesem Schneidverfahren brennt ein fokussierter Laser nach einem computeroder logikgesteuerten Muster durch eine oder mehrere Materialschichten. Das Timing und die Intensität des Lasers sind entscheidend für die Wirksamkeit dieser Schneidmethode. Bei der Verarbeitung von mikrofluidischen Geräten ermöglichen Laser sehr filigrane Schnitte oder können zum „Bohren“ von Löchern in einem Bauteil verwendet werden, die für eine rotierende Matrize sonst schwierig wären.

Laser werden häufig bei der Verarbeitung von Teststreifen eingesetzt, um winzige Leitungen und Entlüftungen zu schneiden, die präzise Mengen von Flüssigkeiten oder Dämpfen leiten. Dieses Beispiel zeigt einen großen Vorteil des Laserschneidens gegenüber der Verwendung einer Rotationsstanze. Ein weiterer Vorteil in Bezug auf die Konvertierung von mikrofluidischen Geräten sind die geringen Kosten für die Änderung von Geometrien und die schnelle Iteration von Prototypen, da nur eine Änderung der Computerprogrammierung und kein hartes Tooling erforderlich ist. Die Nachteile des Laserschneidens sind eine höhere Kostenbarriere für Laserund Computerausrüstung sowie eine Begrenzung der Liniengeschwindigkeit, da Laser oft eine gewisse Zeit benötigen, um Material zu schneiden.⁷

*Ein Hinweis Abfall beim Laserschneiden

und Abtragen: Es sollten besondere Vorsichtsmaßnahmen getroffen werden, um Verkohlungen und abgetragenes Material während des Laserschneidens zu minimieren, da es als Verunreinigung angesehen wird.

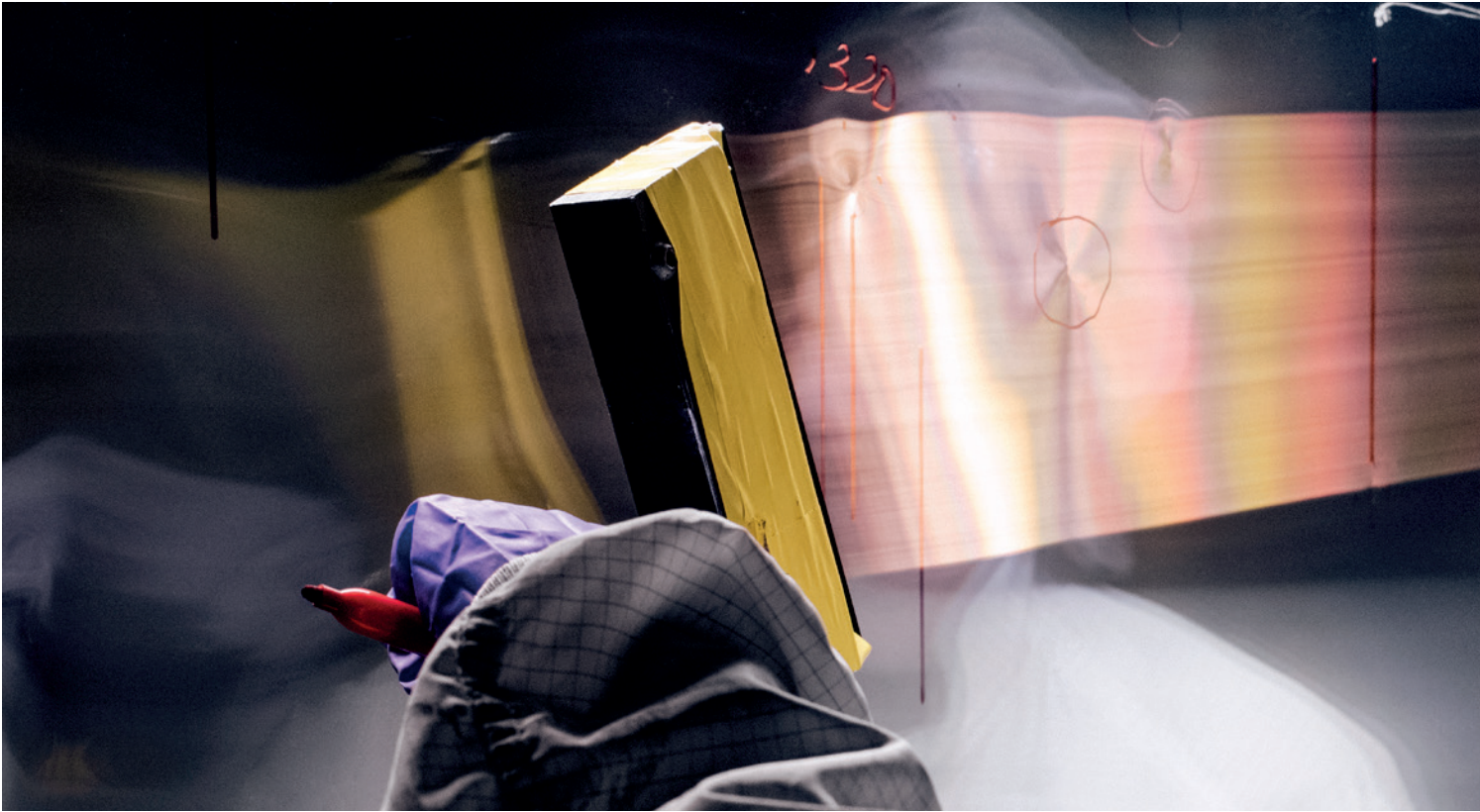
Durchschnitte und kontrollierte Tiefschnitte:

Durchschnitte und Schnitte mit kontrollierter Tiefe sind die beiden am häufigsten verwendeten Schnitte bei der Verarbeitung von Mikrofluidikgeräten. Schneidet separates Material durch, um einem bestimmten Design oder Muster zu entsprechen. Wie der Name schon sagt, durchdringt diese Art des Schnitts ein Bauteil oder einen Stapel von Bauteilen vollständig, um einen Umriss, in der Regel den Gesamtumfang der Gerätekomponente, anzupassen.

Kontrollierte Tiefenoder „Kiss“-Schnitte trennen eine oder mehrere Materialschichten, um eine bestimmte z-dimensionale Geometrie in einem Bauteil oder Stapel zu erreichen. Bei der Laserschneidmethodik wird die Schnitttiefe durch die Laserintensität und die Belichtungszeit gesteuert, während sie beim Rotationswerkzeugverfahren durch präzise bearbeitete Schnittflächen in indexierten Tiefen am Werkzeug gesteuert wird.

Handhabung von Resten:

Sowohl Rotationsstanzen als auch Laser erfordern eine spezielle Handhabung des Beschnitts oder der Entgitterung einer geschnittenen Bahn. Diese muss entweder aufgewickelt oder per Vakuum von der gestanzten Bahn weggezogen werden. Auch bei runden oder gekapselten Schnitten müssen die Reststücke entfernt werden. Diese werden oft mit Luftschläuchen/ Luftmessern ausgeblasen. Wenn Sie ein physikalisches Mittel, wie z. B. rotierende Bürsten oder Schaumstoffstöbel, zum Entfernen von Reststücken verwenden, ist es wichtig, dass die Oberfläche des Bauteils nicht zerkratzt oder anderweitig beschädigt wird.



Fazit

Mikrofluidische Geräte sind für die medizinische Industrie in der Forschung und bei der Untersuchung von Patientenproben extrem wichtig. Die Grundlage für viele mikrofluidische Geräte beginnt mit Klebebandkonstruktionen, die zum Schutz der Proben, zum Transport von Flüssigkeiten und zur Unterstützung der Probenerkennung gedacht sind. Das Verständnis und die Auswahl der richtigen Komponentenmaterialien und der dazugehörigen Fertigungsmethoden ist der Schlüssel zum Design eines mikrofluidischen Geräts.



Quellenangaben:

¹ D. Beddus, B. Bessemer, C. Martin, „Introduction to Extrusion Principles“, Killion Extruder, Inc., Cedar Grove, NJ. 31. Jan. 1989.

² „Rolling Aluminum: From the Mine Through the Mill“, The Aluminum Association, Inc., Arlington, VA. Dritte Auflage, Dez. 2007. S. „The Rolling Mill“ 4-1 – 4-7. {Online}. Verfügbar: https://www.aluminum.org/sites/default/files/Rolling_Aluminum_From_The_Mine_Through_The_Mill.pdf. [Zugriff: 21-Mär-2019].

³ „Rolling Aluminum: From the Mine Through the Mill“, The Aluminum Association, Inc., Arlington, VA. Dritte Auflage, Dez. 2007. S. „Sheet Rolling Operations“ 5-6 – 5-7. {Online}. Verfügbar: https://www.aluminum.org/sites/default/files/Rolling_Aluminum_From_The_Mine_Through_The_Mill.pdf. [Zugriff: 21-Mär-2019].

⁴ „Rolling Aluminum: From the Mine Through the Mill“, The Aluminum Association, Inc., Arlington, VA. Dritte Auflage, Dez. 2007. S. „Production“ 2-5 – 2-6. {Online}. Verfügbar: https://www.aluminum.org/sites/default/files/Rolling_Aluminum_From_The_Mine_Through_The_Mill.pdf. [Zugriff: 21-Mär-2019].

⁵ D. L. Chandler, „Explained: Hydrophob und hydrophil“, MIT News, 16-Jul-2013. [Online]. Verfügbar: <http://news.mit.edu/2013/hydrophobicand-hydrophilic-explained-0716>. [Zugriff: 07-Mär-2019].

⁶ „Principles of Shear Slitting“, Burriss Machine Co., Hickory, NC. S.1-3. {Online}. Verfügbar: https://www.burrismachineco.com/pdfs/Principles_of_shear_slitting_burriss.pdf. [Zugriff: 19-Mär-2019].

⁷ „Laser Die Cutting versus Rotary Die Cutting“, DeltaModTech, 12-Nov-2018. [Online]. Verfügbar: <http://www.deltamodtech.com/blog/choosing-rightlaser-die-cutting-vs-rotary-die-cutting/>. [Zugriff: 22-Mär-2019].

**Besuchen Sie 3M.com/MedTech,
um mehr zu erfahren.**



Medizinische Materialien und Technologien

Carl-Schurz-Str. 1

82229 Seefeld

Deutschland

Telefon 800-584-2787

Web www.3M.com/MedTech

3M ist eine Handelsmarke von 3M.

Bitte recyceln. Gedruckt in den

Vereinigten Staaten.

© 3M 2021. Alle Rechte vorbehalten.

70-2011-7830-1. OMG214287